

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

24. 9. 2004

REC'D 11 NOV 2004

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2003年 7月18日

出 願 番 号
Application Number: 特願2003-199538
[ST. 10/C]: [JP2003-199538]

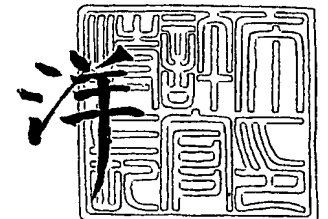
出 願 人
Applicant(s): 日本板硝子株式会社

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年10月28日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川



【書類名】 特許願

【整理番号】 PY20031185

【提出日】 平成15年 7月18日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G02B 5/18
G01J 3/14
G02B 6/12

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子
株式会社 内

【氏名】 橘▲高▼ 重雄

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子
株式会社 内

【氏名】 大家 和晃

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子
株式会社 内

【氏名】 常友 啓司

【特許出願人】

【識別番号】 000004008

【氏名又は名称】 日本板硝子 株式会社

【代理人】

【識別番号】 100068755

【弁理士】

【氏名又は名称】 恩田 博宣

【選任した代理人】

【識別番号】 100105957

【弁理士】

【氏名又は名称】 恩田 誠

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 002956

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9908293

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 フォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、および光学素子

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えたフォトニック結晶導波路であって、

前記電磁波は、前記コアのフォトニックバンド構造における、ブリルアンゾーンの境界線上にあるフォトニックバンドの伝播モードによって伝播し、

前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率 n_s の均質媒体クラッドと接し、前記電磁波の真空中での波長を λ_0 、前記フォトニック結晶の周期を a 、前記コア内を伝播する波動の、前記一方向に垂直な方向の周期を λ とすると、

$$\lambda_0 / n_s > a \lambda / (\lambda^2 / 4 + a^2) \quad 0.5$$

の条件を満たすことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 2】 請求項 1 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 3】 請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路において、

$$\lambda_0 / n_s - a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} \quad 0.5 = 0$$

を満たす前記電磁波の伝搬角 ϕ が $0 < \phi < 90^\circ$ の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝搬角の最大値 ϕ_0 とし、

前記コア内を伝播する波動が前記伝搬角の最大値 ϕ_0 をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとき、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅 $2L$ は、

$$s \lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1) \lambda / 2 \cos \phi_0$$

の範囲にあることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 4】 請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コア内を前記一方向に垂直な方向に伝播する波動が前記側面に垂直入射して反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとすると、

$$\lambda_0 / n_s - 2a > 0 \text{ と}$$

$$s\lambda / 2 \leq 2L$$

を満たすことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 5】 請求項 4 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの導波路長さ方向に垂直な方向における横幅 $2L$ は、

$$s\lambda / 2 \leq 2L < (s+1)\lambda / 2$$

の範囲にあることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 6】 請求項 1～5 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの表面には、前記閉じ込め用クラッドとして、少なくとも前記一方向に周期性を有し前記コアと同一の材料によるフォトニック結晶のクラッド層が設けられており、前記一方向におけるクラッド層によるフォトニックバンドギャップは、前記コアの前記一方向における伝播モードを閉じ込め、かつ前記伝播モードに近接するモードを放射モードとすることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 7】 請求項 1～6 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの周期構造が露出する端面に位相変調手段を備え、前記位相変調手段により、前記コア内を伝播する波動と外部平面波を結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 8】 請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、

n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

で表わす前記一方向における入射角 θ を有する平面波を前記端面と結合させる

ことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 9】 請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、
前記位相変調手段は、

n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、
前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

で表わす前記一方向における入射角 θ を有する同位相の 2 つの平面波を干渉させて前記端面と結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 10】 請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、
前記位相変調手段は、

前記コアの前記一方向と平行な端面である入射面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に 2 倍の周期を有する位相格子であり、

前記位相格子により、前記外部平面波と前記コア内を伝播する波動を結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 11】 請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、
前記位相変調手段は、

前記コアの前記一方向と平行な端面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に同一の周期を有する位相格子であり、

n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、
前記位相格子により前記コア内を伝播する波動（伝播光）と結合される前記外部平面波の入射角或いは出射角 θ は、以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

を満足することを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 12】 請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、
前記位相変調手段は、

前記コアの前記一方向と平行な端面に近接もしくは接触もしくは一体化して配

置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に 2 倍の周期を有する位相格子であり、

n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記位相格子により前記コア内を伝播する波動（伝播光）と結合される前記外部平面波の入射角或いは出射角 θ は、以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

を満足することを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 13】 請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、

前記コアの前記一方向に対して斜めに傾いた端面に、前記外部平面波を直接結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 14】 請求項 1～13 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 15】 一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えたフォトニック結晶導波路であって、

前記電磁波は、前記コアのフォトニックバンド構造における、ブリルアンゾーンの中心線上にある高次フォトニックバンドの伝播モードによって伝播し、

前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率 n_s の均質媒体クラッドと接し、前記電磁波の真空中での波長を λ_0 、前記フォトニック結晶の周期を a 、前記コア内を伝播する波動の、前記一方向に垂直な方向の周期を λ とすると、

$$\lambda_0 / n_s - \lambda > 0$$

の条件を満たすことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 16】 請求項 15 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられ

ていることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 17】 請求項 15 又は 16 に記載のフォトニック結晶導波路において、

$$\lambda_0 / n_s - \lambda / \cos \phi = 0$$

を満たす前記電磁波の伝搬角 ϕ が $0 < \phi < 90^\circ$ の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝搬角の最大値 ϕ_0 とし、

前記コア内を伝播する波動が前記伝搬角の最大値 ϕ_0 をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとすると、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅 $2L$ は、

$$s\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1)\lambda / 2 \cos \phi_0$$

の範囲にあることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 18】 請求項 15～17 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの表面には、前記閉じ込め用クラッドとして、少なくとも前記一方向に周期性を有し前記コアと同一の材料によるフォトニック結晶のクラッド層が設けられており、前記クラッド層によるフォトニックバンドギャップは、前記コアの前記一方向における伝播モードを閉じ込め、かつ前記伝播モードに近接するモードを放射モードとすることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 19】 請求項 15～18 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの周期構造が露出する端面に位相変調手段を備え、前記位相変調手段により、前記コア内を伝播する波動と外部平面波を結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 20】 請求項 19 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、

n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 1.0$$

で表わす前記一方向における入射角 $\pm\theta$ を有する同位相の2つの平面波を干渉させて前記端面と結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項21】 請求項19に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、

n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 1.0$$

で表わす前記一方向における入射角 $\pm\theta$ を有する同位相の2つの平面波と $\theta = 0$ の平面波と同時に干渉させて前記端面と結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項22】 請求項19に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの前記一方向と平行な端面である入射面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に同じ周期を有する位相格子であり、

前記位相格子により、前記外部平面波と前記コア内を伝播する波動を結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項23】 請求項15～22のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項24】 一方向に有限な厚さを有する屈折率 n_0 の均質媒体により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えた均質媒体導波路であって、

前記電磁波は、前記コアの一方向における1次以上の伝播モードによって伝播し、

前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率 n_s の均質媒体クラッドと接し、

$$n_s < n_0$$

の条件を満たすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 25】 請求項 24 に記載の均質媒体導波路において、

前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 26】 請求項 24 又は 25 に記載の均質媒体導波路において、

$$n_s - n_0 \{ \sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi \} - 0.5 = 0$$

を満たす前記電磁波の前記一方向に垂直な方向における伝搬角 ϕ が $0 < \phi < 90^\circ$ の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝搬角の最大値 ϕ_0 とし、

前記コア内を伝播する前記電磁波の真空中での波長を λ_0 、前記一方向での伝播モードの伝搬角を ψ とし、前記コアの一方向に垂直な方向に伝播する波動が前記伝搬角の最大値 ϕ_0 をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとすると、

前記コアの導波路長さ方向における横幅 $2L$ は、

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \sin \phi_0 \leq 2L < (s+1) \lambda_0 \cos \psi / 2 \sin \phi_0$$

の範囲にあることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 27】 請求項 24 又は 25 に記載の均質媒体導波路において、

前記コア内を伝播する波動が前記側面に、前記一方向に垂直な方向（XZ 平面方向）において垂直入射して反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとすると、

$$n_s - n_0 \sin \psi < 0 \text{ と}$$

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \leq 2L$$

を満たすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 28】 請求項 27 に記載の均質媒体導波路において、

前記コアの前記横幅 $2L$ は、

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \leq 2L < (s+1) \lambda_0 \cos \psi / 2$$

の範囲にあることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 29】 請求項 24～28 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

以下の数式において n_0 は前記コアの屈折率、 n_m は入射光側の屈折率、 ψ は前記コア内を伝播する高次モード光の伝搬角とすると、

前記コアが露出する前記一方向と平行な端面に、

$$\sin \theta = (n_0 / n_m) \sin \psi$$

の数式で表わす前記一方向における入射角 θ の外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 30】 請求項 24～28 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

前記コアが露出する前記一方向に対して傾いた端面に、前記コア内を伝播する前記一方向における高次モード光の伝搬角 ψ に結合する入射角を有する外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 31】 請求項 24～28 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

前記コアが露出する前記一方向と平行な端面に、近接あるいは接触あるいは一体化した位相格子を備え、外部の平面波と前記位相格子による回折光を前記コア内を伝播する前記一方向における高次モード光と結合させて、前記平面波を入射光もしくは出射光となすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 32】 請求項 24～31 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 33】 請求項 1～32 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

所定の結合長 (L_1) の結合領域 (302a, 303a) で近接するように屈曲して形成された 2 つの導波路 (302, 303) を有する方向性結合器 (30

0 A) として構成され、

前記 2 つの導波路 (302, 303) を前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成したことを特徴とする光学素子。

【請求項 34】 請求項 1～32 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

一つの直線状の導波路 (351) と、この導波路から分岐した 2 つの導波路 (352, 353) と、これら 2 つの導波路が合流した一つの直線状の導波路 (354) と有するマッハツェンダー型光スイッチ (350) として構成され、

前記各導波路 (351～354) を、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成したことを特徴とする光学素子。

【請求項 35】 請求項 1～32 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

直線状の導波路と遅延部分 (423, 433) を含む一つの導波路を有する光遅延線 (420, 430) として構成され、

前記導波路と遅延部分 (423) を前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成されていることを特徴とする光学素子。

【請求項 36】 請求項 1～32 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路を備えた分散制御素子として構成され、

前記導波路を伝播する伝播光として分散の大きい条件の伝播光を用いることを特徴とする光学素子。

【請求項 37】 請求項 1～32 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路 (610) を備え、前記導波路のコア (611) に非線形特性を有する物質を含ませてあり、

前記導波路の前記一方向における両側表面に 2 つの電極を設けた電極付導波路素子として構成したことを特徴とする光学素子。

【請求項 38】 請求項 1～31 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路 (610) を備え、前記導波路のコア (611) に非線形特性を有する物質を含ませてあり、

前記導波路の前記一方向における両側表面に 2 つの電極を設けた電極付導波路素子 (600B) として構成し、

前記 2 つの電極に印加する電圧や電流を変化させる変調器を備えることを特徴とする光学素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、周期性のない方向に電磁波を伝播させる、導波路形状の 1 次元フォトニック結晶を用いたフォトニック結晶導波路、均質媒体のコアを備えた均質媒体導波路、および方向性結合器や光スイッチなどの光学素子に関する。

【0002】

【従来の技術】

基板上に導波路を配置した光素子は既に実用化しているが、最近になって 2 次元フォトニック結晶 (2D-PhC) を用いた欠陥導波路が注目され、研究開発が盛んに行なわれている。即ち、高屈折率の薄膜層 (Si など) に規則的な空孔を配置して 2 次元フォトニック結晶となし、使用周波数域において平面方向 (XZ 方向) の完全フォトニックバンドギャップを形成する。この 2D-PhC に線状の欠陥を設けると、欠陥部分に入った光はフォトニック結晶部分に出て行くことができず閉じ込められるので、導波路となる (特許文献 1 参照)。

【0003】

2D-PhC を用いた導波路には、次のような特徴がある。

・導波路の急激曲げ (60° 、 90° など) が可能なので、個別の光素子そのもの、あるいは光素子間を繋ぐ配線を、非常にコンパクトなものとする事ができる。

【0004】

・導波路中を伝搬する電磁波に「群速度異常」を起こすことができ、非線形作用を大きくして素子の特性を改善したり、サイズを小さくすることができる。

このような2次元或いは3次元フォトニック結晶による導波路或いはフォトニック結晶によらない通常の導波路を用いた光学素子として、次のようなものがある。

【0005】

・光合分波器としての方向性結合器（特許文献2参照）。

・外部からの電流注入や光の照射によりオン／オフ操作を行う光スイッチ（特許文献3参照）。

【0006】

・対称マッハツェンダー型全光スイッチ（非特許文献1参照）。

・光遅延線（非特許文献2参照）。

・点欠陥共振器（特許文献4，5参照）。

【0007】

【特許文献1】

特開 2001-281480

【特許文献2】

特開 2001-174652

【特許文献3】

特開 2002-303836

【特許文献4】

特開 2001-272555

【特許文献5】

特開 2003-161971

【非特許文献1】

「オプトロニクス」2002年4月号、132頁

【非特許文献2】

「フォトニック結晶技術とその応用」244頁（シーエムシー出版、200

2年)

【0008】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上記従来の導波路には次のような問題点があった。

導波路を構成するフォトニック結晶の構造が正方形配列の場合、急激曲げの角度はほとんど 90° に限られる。同様に、三角配列の場合は 60° か 120° である。従って導波路や、導波路を用いて構成した上述したような各種の光学阻止を自由な角度で配置することができず、設計上の制約となる。

【0009】

本発明は、このような従来の問題点に着目してなされたもので、その目的は、急激曲げや自由な角度での配置が可能で、かつ低伝搬損失のフォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、およびこれらを用いた光学素子を提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決するため、請求項1に係る発明は、一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えたフォトニック結晶導波路であって、前記電磁波は、前記コアのフォトニックバンド構造における、ブリルアンゾーンの境界線上にあるフォトニックバンドの伝播モードによって伝播し、前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率 n_s の均質媒体クラッドと接し、前記電磁波の真空中での波長を λ_0 、前記フォトニック結晶の周期を a 、前記コア内を伝播する波動の、前記一方向に垂直な方向の周期を λ とすると、

$$\lambda_0 / n_s > a \lambda / (\lambda^2 / 4 + a^2) \quad 0.5$$

の条件を満たすことを要旨とする。

【0011】

フォトニック結晶の高次バンドによる伝播光（高次バンド伝播光）を利用する光学素子は非常に有用である。フォトニック結晶内を前記一方向と垂直な方向に進む高次バンド伝播光は、ブリルアンゾーンの境界線上にあるフォトニックバンドを利用して得ることができる。

【0012】

ブリルアンゾーンの境界線上では、全てのバンドが高次バンドと同様な変化をなす。したがって、全てのバンドにおいて「実効屈折率の波長による大きな変化」や「群速度異常」が起こるので、これらの特性を利用して光遅延素子や分散制御素子などの光学素子を、入射光エネルギーの利用効率やS/N比を低下させずに作ることができる。

【0013】

フォトニック結晶導波路の側面（前記一方向に垂直な平面と平行）には、市松模様の電場パターンが露出している。その側面は屈折率 n_s の均質媒体と接しているとすると、その側面には、複数種類の周期に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。漏れ光が生じないようにするための最低限必要な条件は、

$$\lambda_0 / n_s > a \lambda / (\lambda^2 / 4 + a^2) \quad (0.5)$$

である。

【0014】

請求項1に係る発明によれば、上記条件を満たすことで、ブリルアンゾーンの境界線上のフォトニックバンドによりコア内を前記一方向と垂直な方向に伝播する波動を、伝搬角 ϕ が $\phi = 0^\circ$ の場合にコアの前記側面で閉じ込めることができる。

【0015】

ここで、「一方向に垂直な方向」とは、一方向に垂直な平面と平行なあらゆる方向をいう。例えば、一方向をY方向とすると、「一方向に垂直な方向」とは、Y方向に垂直なXZ平面と平行なあらゆる方向（XZ平面方向）をいう。

【0016】

請求項2に係る発明は、請求項1に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを要旨とする。

【0017】

この構成によれば、閉じ込め用クラッドにより、コア内を伝播する電磁波がコアの一方向に垂直な表面から外部に漏れるのを阻止できる。

請求項3に係る発明は、請求項1又は2に記載のフォトニック結晶導波路において、

$$\lambda_0 / n_s - a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5} = 0$$

を満たす前記電磁波の伝搬角 ϕ が $0 < \phi < 90^\circ$ の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝搬角の最大値 ϕ_0 とし、前記コア内を伝播する波動が前記伝搬角の最大値 ϕ_0 をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとき、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅 $2L$ は、

$$s \lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1) \lambda / 2 \cos \phi_0$$

の範囲にあることを要旨とする。

【0018】

ここにいう「電磁波の伝搬角 ϕ 」は、コア内を伝播する電磁波の、前記一方向に垂直な方向（例えば、XZ平面方向）における進行方向と、コアの導波路長さ方向とがなす角度をいう。

【0019】

一般にフォトニック結晶のコア内を伝搬光が前記一方向に垂直な方向に対して伝搬角 ϕ だけ傾いて進行する場合、コアの前記側面には、複数種類の周期に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。ただし、漏れ光が生じるのは周期 $a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5}$ に対応する波面が

$$\lambda_0 / n_s < a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5}$$

の条件を満たす場合に限られる。

【0020】

請求項3に係る発明によれば、前記の条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路を「不完全閉じ込め単一モード導波路」に構成できる。この導波路では、

伝搬角 ϕ によっては漏れ光の発生する条件であるが、導波路幅 $2L$ を充分小さく
とっているので単一モード条件となる。

【0021】

- ・伝搬角 ϕ が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生
じるので、伝搬角 ϕ がその最大値 ϕ_0 を超えない範囲で急激曲げが可能になる。
- ・分散や群速度異常といった特性が小さいことが望ましい、単純な導波路に適
している。

【0022】

請求項 4 に係る発明は、請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路にお
いて、前記コア内を前記一方向に垂直な方向に伝播する波動が前記側面に垂直入
射して反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとする
と、

$$\lambda_0 / n_s - 2a > 0 \text{ と}$$

$$s\lambda / 2 \leq 2L$$

を満たすことを要旨とする。

【0023】

この構成によれば、前記の条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路を「
完全閉じ込め多モード導波路」とすることができ、次のような作用効果が得られ
る。

【0024】

- ・伝搬角 ϕ によらず伝播する波動がコア内に閉じ込められるので、共振器など
に適する。
- ・導波路幅は一定である必要も無く、上限も無いので、自由な形状の共振器と
することができる。

【0025】

- ・群速度が遅い（分散が大きい）領域であれば、非線形作用が増強されるので
、非線形作用を利用する光素子の特性を大きくすることができる。共振器と組み
合わせてレーザー発振などを行うこともできる。

【0026】

請求項 5 に係る発明は、請求項 4 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの導波路長さ方向に垂直な方向における横幅 $2L$ は、

$$s\lambda/2 \leq 2L < (s+1)\lambda/2$$

の範囲にあることを要旨とする。

【0027】

この構成によれば、前記の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路を「完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。導波路幅 $2L$ は、伝搬角 ϕ の値にかかわらず、位相整合条件における 0 次モードのみ存在する範囲にある。このような「完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

【0028】

・単一モード伝播のまま急激曲げが可能で、導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。

・完全な閉じ込めとなるのは、 a/λ_0 が 0.5 以下という小さい値に対応し、実効屈折率 (n_{eff}) が比較的小さく、分散や群速度異常の大きい領域となる。従って、分散や群速度異常といった特性が大きいことが望ましい、機能性導波路に適している。群速度が遅い（分散が大きい）領域であれば、非線形作用が增強されるので、非線形作用を利用する光学素子の特性を大きくする、あるいは光路長を短縮することができる。

【0029】

請求項 6 に係る発明は、請求項 1～5 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの表面には、前記閉じ込め用クラッドとして、少なくとも前記一方向に周期性を有し前記コアと同一の材料によるフォトニック結晶のクラッド層が設けられており、前記一方向におけるクラッド層によるフォトニックバンドギャップは、前記コアの前記一方向における伝播モードを閉じ込め、かつ前記伝播モードに近接するモードを放射モードとすることを要旨とする。

【0030】

導波路内の伝播光の前記一方向に垂直な方向（XZ 平面方向）における実効屈折率が 1 未満になると、媒体を空気としても前記一方向における電磁波の漏れを

防ぐことができなくなる。しかし、この構成によれば、前記一方向に垂直な方向（XZ平面方向）における実効屈折率が1未満になる場合でも、コアの表面に設けたフォトニック結晶のフォトニックバンドギャップにより前記一方向における電磁波の閉じ込めを行なうことができる。これにより、伝搬損失が小さくかつ低コストのフォトニック結晶導波を実現できる。

【0031】

請求項7に係る発明は、請求項1～6のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの周期構造が露出する端面に位相変調手段を備え、前記位相変調手段により、前記コア内を伝播する波動と外部平面波を結合させることを要旨とする。

【0032】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの境界線上にある特定の高次バンドに属する伝播光のみを得ることができる。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝播光を平面波に戻すことができる。

【0033】

請求項8に係る発明は、請求項7に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、 n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

で表わす前記一方向における入射角 θ を有する平面波を前記端面と結合させることを要旨とする。

【0034】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの境界線上のフォトニックバンドによりコア内をZ方向に伝播する波動と平面波とを結合させることができる。

請求項9に係る発明は、請求項7に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、 n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

で表わす前記一方向における入射角 $\pm \theta$ を有する同位相の2つの平面波を干渉させて前記端面と結合させることを要旨とする。

【0035】

この構成によれば、2方向の平面波を交差させて干渉波を作り、そこに前記端面を設置すれば、入射光をブリルアンゾーンの境界線上にある単一のフォトニックバンドによる伝播光と結合させることができる。

【0036】

請求項10に係る発明は、請求項7に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、前記コアの前記一方向と平行な端面である入射面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に2倍の周期を有する位相格子であり、前記位相格子により、前記外部平面波と前記コア内を伝播する波動を結合させることを要旨とする。

【0037】

この構成によれば、フォトニック結晶と同一方向に2倍の周期を有する位相格子に平面波の入射光を垂直入射させると、+1次回折光と-1次回折光との干渉により、「平面波による干渉」の場合と同様な腹（電場の山と谷）と節のある電場パターンを作ることができる。ここで、電場の山と谷が、コアを構成する周期的多層膜構造であるフォトニック結晶の高屈折率層に存在し、節がその低屈折率層に存在するようにフォトニック結晶を配置すると、第1バンドによる伝播光のみが得られる。電場の山と谷がその低屈折率層に存在し、節がその高屈折率層に存在するようにフォトニック結晶を配置すると、第2バンドによる伝播光のみが得られる。

【0038】

請求項11に係る発明は、請求項7に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、前記コアの前記一方向と平行な端面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に同一の周期を有する位相格子であり、 n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記位相格子により前記コア内を伝播す

る波動と結合される前記外部平面波の入射角或いは出射角 θ は、以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

を満足することを要旨とする。

【0039】

この構成によれば、特定のバンドによる伝播光を得ることができる。

請求項12に係る発明は、請求項7に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、前記コアの前記一方向と平行な端面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に2倍の周期を有する位相格子であり、 n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記位相格子により前記コア内を伝播する波動と結合される前記外部平面波の入射角或いは出射角 θ は、以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

を満足することを要旨とする。

【0040】

この構成によれば、 a / λ_0 の値が小さい場合でも、特定のバンドによる伝播光を得ることができる。

請求項13に係る発明は、請求項7に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、前記コアの前記一方向に対して斜めに傾いた端面に、前記外部平面波を直接結合させることを要旨とする。

【0041】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの境界線上にある特定の高次バンドに属する伝播光のみを得ることができる。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝播光を平面波に戻すことができる。

【0042】

請求項14に係る発明は、請求項1～13のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを要旨とするフォトニック結晶導波路。

【0043】

この構成によれば、コアの前記横幅（導波路幅 $2L$ ）を、たとえばその入射部

分の導波路幅を多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ状に横幅を狭くして単一モード導波路に変換するような「テーパ導波路」にすることができる。このように単一モード条件を満たすコアの前記横幅を、コアの入射面の近くでテーパ状に拡大すると、外部との接続効率を改善することができる。

【0044】

これに対して、上記従来技術（２次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路）では、XZ方向のフォトニックバンドギャップを完全なものとするためには、フォトニック結晶の屈折率差を大きくする必要がある、高屈折率物質（たとえば $n = 3.48$ の Si）と空気の組み合わせなどが選ばれる。導波路のコアをなす欠陥部分の屈折率が非常に大きくなるため、単一モード条件を満たすために導波路コアの断面が非常に小さくなる（典型的には $1 \times 1 \mu\text{m}$ 以下）。上記特許文献１の方法では、導波路断面を $2 \times 2 \mu\text{m}$ 程度まで大きくしているが、外部の単一モード光ファイバ（コア $\phi 10 \mu\text{m}$ 程度）との差が大きく、効率良く結合させることが難しい。

【0045】

請求項 15 に係る発明は、一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えたフォトニック結晶導波路であって、前記電磁波は、前記コアのフォトニックバンド構造における、ブリルアンゾーンの中心線上にある高次フォトニックバンドの伝播モードによって伝播し、前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率 n_s の均質媒体クラッドと接し、前記電磁波の真空中での波長を λ_0 、前記フォトニック結晶の周期を a 、前記コア内を伝播する波動の、前記一方向に垂直な方向の周期を λ とすると、

$$\lambda_0 / n_s - \lambda > 0$$

の条件を満たすことを要旨とするフォトニック結晶導波路。

【0046】

ブリルアンゾーンの中心線上にある特定の高次フォトニックバンドによる伝播光を得るには、例えば、コアを構成する周期 a のフォトニック結晶に対して、同じ方向に周期 a を有する位相変調波を入射させればよい。

【0047】

請求項15に係る発明によれば、上記条件を満たすことで、ブリルアンゾーンの中心線上にある特定の高次フォトリックバンドによりコア内をZ方向に伝播する波動、つまり伝搬角 ϕ が $\phi = 0^\circ$ の波動をコアの前記側面で閉じ込めることができる。すなわち、前記一方向に垂直な方向の閉じ込めを実現するため最低限必要な条件である。ここで、「高次フォトリックバンド」とは、最低次以外のフォトリックバンドを意味する。

【0048】

請求項16に係る発明は、請求項15に記載のフォトリック結晶導波路において、前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトリック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを要旨とする。

【0049】

この構成によれば、閉じ込め用クラッドにより、コア内を伝播する電磁波がコアの一方向に垂直な表面から外部に漏れるのを阻止できる。

請求項17に係る発明は、請求項15又は16に記載のフォトリック結晶導波路において、

$$\lambda_0 / n_s - \lambda / \cos \phi = 0$$

を満たす前記電磁波の伝搬角 ϕ が $0 < \phi < 90^\circ$ の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝搬角の最大値 ϕ_0 とし、

前記コア内を伝播する波動が前記伝搬角の最大値 ϕ_0 をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとすると、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅 $2L$ は、

$$s\lambda / 2\cos\phi_0 \leq 2L < (s+1)\lambda / 2\cos\phi_0$$

の範囲にあることを要旨とする。

【0050】

この構成によれば、前記の条件を満たすことで、フォトリック結晶導波路を「不完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。すなわち、コア内を伝

播する波動の伝搬角の最大値が ϕ_0 である場合において、コアの横幅 $2L$ を充分小さくとることにより単一モード条件となる。

【0051】

このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

- ・伝搬角 ϕ によっては漏れ光の発生する条件であるが、コアの横幅 $2L$ を充分小さくとっているので単一モード条件となる。

【0052】

- ・伝搬角 ϕ が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0053】

- ・ a/λ_0 を小さくすると、分散や群速度異常の大きい領域となる。従って、機能素子に適している。

請求項 18 に係る発明は、請求項 15～17 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの表面には、前記閉じ込め用クラッドとして、少なくとも前記一方向に周期性を有し前記コアと同一の材料によるフォトニック結晶のクラッド層が設けられており、前記クラッド層によるフォトニックバンドギャップは、前記コアの前記一方向における伝播モードを閉じ込め、かつ前記伝播モードに近接するモードを放射モードとすることを要旨とするフォトニック結晶導波路。

【0054】

導波路内の伝播光の前記一方向に垂直な方向における実効屈折率が 1 未満になると、媒体を空気としても前記一方向における電磁波の漏れを防ぐことができなくなる。しかし、この構成によれば、前記一方向に垂直な方向における実効屈折率が 1 未満になる場合でも、コアの表面に設けたフォトニック結晶のフォトニックバンドギャップにより前記一方向における電磁波の閉じ込めを行なうことができる。

【0055】

請求項 19 に係る発明は、請求項 15 ～ 18 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの周期構造が露出する端面に位相変調手段を備え、前記位相変調手段により、前記コア内を伝播する波動と外部平面波を結合させることを要旨とする。

【0056】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの中央線上にある特定の高次フォトニックバンドに属する伝播光のみを得ることができる。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝播光を平面波に戻すことができる。

【0057】

請求項 20 に係る発明は、請求項 19 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、 n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 1.0$$

で表わす前記一方向における入射角 θ を有する同位相の 2 つの平面波を干渉させて前記端面と結合させることを要旨とする。

【0058】

この構成によれば、2 方向の平面波を交差させて干渉波を作り、そこに前記端面を設置すれば、入射光の大部分を高次バンド伝播光にすることができる。

請求項 21 に係る発明は、請求項 19 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、 n は外部媒体の屈折率、 λ_0 は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 1.0$$

で表わす前記一方向における入射角 θ を有する同位相の 2 つの平面波と $\theta = 0$ の平面波と同時に干渉させて前記端面と結合させることを要旨とする。

【0059】

この構成によれば、2 方向の平面波を交差させて干渉波を作り、そこに前記端面を設置する場合よりも、高次バンド伝播光の割合をさらに増やすことができる。

。

【0060】

請求項 22 に係る発明は、請求項 19 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの前記一方向と平行な端面である入射面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に同じ周期を有する位相格子であり、前記位相格子により、前記外部平面波と前記コア内を伝播する波動を結合させることを要旨とする。

【0061】

この構成によれば、特定の高次バンド伝播光を得ることができる。

請求項 23 に係る発明は、請求項 15～22 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを要旨とする。

【0062】

この構成によれば、コアの前記横幅（導波路幅 $2L$ ）を、たとえばその入射部分の導波路幅を多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ状に横幅を狭くして単一モード導波路に変換するような「テーパ導波路」にすることができる。このように単一モード条件を満たすコアの前記横幅を、コアの入射面の近くでテーパ状に拡大すると、外部との接続効率を改善することができる。

【0063】

請求項 24 に係る発明は、一方向に有限な厚さを有する屈折率 n_0 の均質媒体により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えた均質媒体導波路であって、前記電磁波は、前記コアの一方向における 1 次以上の伝播モードによって伝播し、前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率 n_s の均質媒体クラッドと接し、

$$n_s < n_0$$

の条件を満たすことを要旨とする。

【0064】

この構成によれば、コア内を前記一方向に垂直な方向に伝播する波動、つまり伝搬角 ϕ が $\phi = 0^\circ$ の波動をコアの前記側面で閉じ込めることができる。すなわ

ち、前記一方向に垂直な方向の閉じ込めを行うための最低条件である。

【0065】

請求項 25 に係る発明は、請求項 24 に記載の均質媒体導波路において、前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを要旨とする。

【0066】

高次モード伝播光の前記一方向に垂直な方向における実効屈折率が 1 未満になると、媒体を空気としても前記一方向における電磁波の漏れを防ぐことができなくなる。しかし、この構成によれば、前記一方向に垂直な方向における実効屈折率が 1 未満になる場合でも、コアの表面に設けたフォトニック結晶のフォトニックバンドギャップにより前記一方向における電磁波の閉じ込めを行なうことができる。これにより、伝搬損失が小さくかつ低コストのフォトニック結晶導波を実現できる。

【0067】

請求項 26 に係る発明は、請求項 24 又は 25 に記載の均質媒体導波路において、

$$n_s - n_0 \{ \sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi \} - 0.5 = 0$$

を満たす前記電磁波の前記一方向に垂直な方向における伝搬角 ϕ が $0 < \phi < 90^\circ$ の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝搬角の最大値 ϕ_0 とし、

前記コア内を伝播する前記電磁波の真空中での波長を λ_0 、前記一方向での伝播モードの伝搬角を ψ とし、前記コアの一方向に垂直な方向に伝播する波動が前記伝搬角の最大値 ϕ_0 をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとすると、

前記コアの導波路長さ方向における横幅 $2L$ は、

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \sin \phi_0 \leq 2L < (s+1) \lambda_0 \cos \psi / 2 \sin \phi_0$$

0

の範囲にあることを要旨とする。

【0068】

この構成によれば、前記の必要条件を満たすことで、均質媒体導波路を「不完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

【0069】

・伝搬角 ϕ によっては漏れ光の発生する条件であるが、横幅 $2L$ を充分小さくとっているので単一モード条件となる。

・伝搬角 ϕ が ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生じるので、伝搬角 ϕ がその最大値 ϕ_0 を超えない範囲で急激曲げが可能になる。

【0070】

請求項 27 に係る発明は、請求項 24 又は 25 に記載の均質媒体導波路において、前記コア内を伝播する波動が前記側面に、前記一方向に垂直な方向（XZ 平面方向）において垂直入射して反射する場合の位相変化量が $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲にあるとすると、

$$n_s - n_0 \sin \psi < 0 \text{ と}$$

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \leq 2L$$

を満たすことを要旨とする。

【0071】

この構成によれば、以下の必要条件を満たすことで、均質媒体導波路を「完全閉じ込め多モード導波路」とすることができ、次のような作用効果が得られる。

・伝搬角 ϕ によらず光が閉じ込められるので、共振器などに適する。導波路幅は一定である必要も無く、上限も無いので、自由な形状の共振器とすることができる。

【0072】

請求項 28 に係る発明は、請求項 27 に記載の均質媒体導波路において、前記コアの前記横幅 $2L$ は、

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \leq 2L < (s+1) \lambda_0 \cos \psi / 2$$

の範囲にあることを要旨とする。

【0073】

この構成によれば、導波路幅 $2L$ は、前記一方向に垂直な方向（ XZ 平面方向）の伝搬角 ϕ の値にかかわらず、位相整合条件における 0 次モードのみ存在する範囲にある。このような「完全閉じ込み単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

【0074】

・単一モード伝播のまま急激曲げが可能で、導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。

請求項 29 に係る発明は、請求項 24 ～ 28 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、以下の数式において n_0 は前記コアの屈折率、 n_m は入射光側の屈折率、 ψ は前記コア内を伝播する高次モード光の伝搬角とすると、前記コアが露出する前記一方向と平行な端面に、

$$\sin \theta = (n_0 / n_m) \sin \psi$$

の数式で表わす前記一方向における入射角 θ の外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを要旨とする。

【0075】

この構成によれば、入射光を、特定の高次モード伝播光（伝搬角 ψ ）と結合させることができる。

請求項 30 に係る発明は、請求項 24 ～ 28 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、前記コアが露出する前記一方向に対して傾いた端面に、前記コア内を伝播する前記一方向における高次モード光の伝搬角 ψ に結合する入射角を有する外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを要旨とする。

【0076】

この構成によれば、入射光を、伝搬角 ψ の値が大きい特定の高次モード伝播光と結合させることができる。

請求項 31 に係る発明は、請求項 24 ～ 28 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、前記コアが露出する前記一方向と平行な端面に、近接あるいは接触あるいは一体化した位相格子を備え、外部の平面波と前記位相格子による回

折光を前記コア内を伝播する前記一方向における高次モード光と結合させて、前記平面波を入射光もしくは出射光となすことを要旨とする。

【0077】

この構成によれば、端面に垂直入射する入射光を、特定の高次モード伝播光と結合させることができる。

請求項32に係る発明は、請求項24～31のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを要旨とする。

【0078】

この構成によれば、コアの前記横幅（導波路幅 $2L$ ）を、たとえばその入射部分の導波路幅を多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ状に横幅を狭くして単一モード導波路に変換するような「テーパ導波路」にすることができる。このように単一モード条件を満たすコアの前記横幅を、コアの入射面の近くでテーパ状に拡大すると、外部との接続効率を改善することができる。

【0079】

請求項33に係る発明は、請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、所定の結合長（ $L1$ ）の結合領域（302a, 303a）で近接するように屈曲して形成された2つの導波路（302, 303）を有する方向性結合器（300A）として構成され、前記2つの導波路（302, 303）を前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成したことを要旨とする。

【0080】

この構成によれば、以下の作用効果が得られる。

・方向性結合器の2つの導波路が前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、方向性結合器自体の小型化が可能になるとともに、集積化が容易になる。

【0081】

・各導波路の結合領域前後の屈曲部において急激曲げが可能になるので、各導

波路全体の長さを、上記特許文献2のような従来技術より大幅に短くすることができる。

【0082】

・各導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝搬損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

・各導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になる。

【0083】

・各導波路では、大きい分散や遅い群速度の伝播光が得られる。そのため、2つの導波路の結合領域の結合長を従来の方向性結合器の導波路よりもはるかに短くすることができ、小型化を図ることができるとともに、方向性結合器の機能を高めることができる。

【0084】

・各導波路をフォトニック結晶導波路とする場合、単純な周期的多層膜構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくてもよいので、方向性結合器を低コストで製作することができる。

【0085】

請求項34に係る発明は、請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、一つの直線状の導波路(351)と、この導波路から分岐した2つの導波路(352, 353)と、これら2つの導波路が合流した一つの直線状の導波路(354)と有するマッハツェンダー型光スイッチ(350)として構成され、前記各導波路(351～354)を、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成したことを要旨とする。

【0086】

この構成によれば、以下の作用効果が得られる。

・マッハツェンダー型光スイッチの各導波路(351～354)は前記フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路で構成されているので、各導波路の急激な曲げが可能であり、基板上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、

上記特許文献3のような2次元フォトニック結晶を有する光スイッチと比べて、光スイッチ自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

【0087】

・特許文献3のような光スイッチでは、平面方向（XZ方向）の閉じ込めはPBGにより行なわれているが、上下方向（Y方向）の閉じ込めはより困難であり、伝搬損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、いわゆる「エアーブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。したがって、このような従来の欠陥導波路を用いてマッハツェンダー型光スイッチを作製すると、伝搬損失が大きく、コスト高になってしまう。これに対して、各導波路（351～354）を構成するフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝搬損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

【0088】

・各導波路を構成するフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

【0089】

・各導波路（351～354）をフォトニック結晶導波路とする場合、周期的積層構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくてもよいので、マッハツェンダー型光スイッチを低コストで製作することができる。

【0090】

請求項35に係る発明は、請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、直線状の導波路と遅延部分（423，433）を含む一つの導波路を有する光遅延線（420，430）として構成され、前記導波路と遅延部分（423）を前記フォトニック

結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成されていることを要旨とする。

【0091】

この構成によれば、以下の作用効果が得られる。

- ・導波路と遅延部分を含む一つの導波路に、閉じ込めの強いフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路のいずれかを用いているので、自由な形状の導波路とすることができる。従って、急峻曲げにこだわらず、わずかな曲率半径を持たせることによって曲げ損失を改善可能となり、小型化と低損失化を同時に実現する光遅延線を設計することができる。

【0092】

- ・光遅延線を、1次元フォトニック結晶によるフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いて低コストで実現することができる。

- ・遅延部分の急峻曲げが可能であり、基板上における光遅延線の配置の自由度が増す。このため、光遅延線自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

【0093】

- ・前記一つの導波路を構成するフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

【0094】

- ・前記一つの導波路をフォトニック結晶導波路とする場合、単純な周期的多層膜構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくてもよいので、光遅延線を低コストで製作することができる。

【0095】

- ・長い経路の遅延部分を基板上に小さな面積で配置することができ、小型化と集積化とをさらに図ることができる。

請求項36に係る発明は、請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニッ

ク結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路を備えた分散制御素子として構成され、前記導波路を伝播する伝播光として分散の大きい条件の伝播光を用いることを要旨とする。

【0096】

この構成によれば、分散の大きい条件の伝播光を用いることにより、光通信システムにおいて分散の生じた信号に逆の分散を与えることができ、長距離の光ファイバによる波長分散を補償することができる。

【0097】

請求項37に係る発明は、請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路(610)を備え、前記導波路のコア(611)に非線形特性を有する物質を含ませてあり、前記導波路の前記一方向における両側表面に2つの電極を設けた電極付導波路素子として構成したことを要旨とする。

【0098】

この構成によれば、電極に印加する電圧や電流を制御することにより、フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路のコアに含ませてある非線形物質の非線形作用を制御することができる。これにより、群速度異常による非線形効果を可変にできるとともに、非線形効果の大きい非線形素子を実現することができる。

【0099】

請求項38に係る発明は、請求項1～31のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路(610)を備え、前記導波路のコア(611)に非線形特性を有する物質を含ませてあり、前記導波路の前記一方向における両側表面に2つの電極を設けた電極付導波路素子(600B)として構成し、前記2つの電極に印加する電圧や電流を変化させる変調器を備えることを要旨とする。

【0100】

この構成によれば、前記導波路の前記一方向における両側表面に設けた2つの電極に印加する電圧や電流を変調器により変化させることにより、入射光に位相、振幅、偏波面、周波数などの変調を加えた変調された信号光を出射させることができる。

【0101】

【発明の実施の形態】

本発明の各実施形態に係るフォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、およびこれらを用いた光学素子を説明する前に、各実施形態で用いる1次元フォトニック結晶について説明する。

【0102】

〔1次元フォトニック結晶〕

図1は、一方向（Y方向）にのみ周期性を有する1次元フォトニック結晶50の、周期性のない方向（Z方向）における電磁波の伝播を模式的に示している。

【0103】

この1次元フォトニック結晶50は、例えば厚さ t_A の物質A（屈折率 n_A ）と厚さ t_B の物質B（屈折率 n_B ）を交互に積み重ねた周期 $a = (t_A + t_B)$ をもった周期的多層膜である。

【0104】

図1において、1次元フォトニック結晶50の一端面50aから真空中の波長 λ_0 の平面波（電磁波）である入射光51を入射させたとき、この入射光51は伝播光52となってフォトニック結晶50内を伝播し、他端面50bから出射される出射光53となる。その入射光51が1次元フォトニック結晶50内でどのように伝播するかは、フォトニックバンドを計算してバンド図を作成することにより知ることができる。なお、1次元フォトニック結晶50において、それぞれ外部との「結合面」である一端面50aおよび他端面50bは、周期性が露出する端面でありかつ周期方向（一方向）であるY方向と平行な端面であり、それぞれ入射面および出射面となっている。

【0105】

バンド計算の方法は、例えば“Photonic Crystals”, Princeton

University Press (1955) あるいは、Physical Review B 44巻, 16号、p.8565、1991年、などに詳しく記載されている。

【0106】

バンド計算に際しては、図1に示す1次元フォトリック結晶50は、Y方向（積層方向）には無限に続く周期構造を有し、紙面に垂直なX方向およびZ方向（周期的多層膜の各層面の広がる方向）には無限に広がっているものと仮定する。

図2は、

屈折率 $n_F = 2.1011$ ($t_F = 0.3a$)

屈折率 $n_G = 1.4578$ ($t_G = 0.7a$)

の層を交互に重ねた周期 a の多層構造体（1次元フォトリック結晶50）について、Y方向およびZ方向におけるバンド計算の結果を、TE偏光の第1バンド、第2バンドおよび第3バンドについて第1ブリルアンゾーンの範囲内で示したものである。図2に示すバンド図は、規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$ が同じ値になる点を結ぶことによって等高線状となり、図中の添字は、 $\omega a / 2\pi c$ の値をそれぞれ意味する。ここで、 ω は入射光51の角振動数、 a は多層構造体（1次元フォトリック結晶50）の周期、 c は真空中の光速である。

【0107】

規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$ は、真空中の入射光の波長 λ_0 を用いて、 a / λ_0 とも表わすことができるので、以下では規格化周波数を簡単に a / λ_0 と記述する。

【0108】

図2に示すブリルアンゾーンのY方向の幅は、 $2\pi / a$ であるが、フォトリック結晶50はZ方向に周期性がないので、図1でX方向（紙面に垂直な方向）およびZ方向を含む横方向にはブリルアンゾーンの境界が存在せず、ブリルアンゾーンはどこまでも広がっている。また、TE偏光は電場の向きがX方向である偏光を表わす。TM偏光（磁場の向きがX方向である偏光）のバンド図（図示省略）は、TE偏光のものに類似しているが、幾分異なった形状となる。

【0109】

このような図1に示す1次元フォトリック結晶50の一端面50aに入射した

平面波である入射光 51 について、フォトニック結晶 50 内での伝播光 52 を考える。

【0110】

図 3 は、特定の周波数 a/λ_0 の平面波 (TE 偏光) を、1 次元フォトニック結晶 50 の一端面 50a からその一端面に垂直に入射させた場合の伝播を模式的に示している。つまり、1 次元フォトニック結晶 50 の一端面 50a に垂直入射した入射光 (平面波) 51 とフォトニック結晶 50 との結合をフォトニックバンドで示している。

【0111】

入射側の均質物質の屈折率を n とすると、その均質物質のバンド図は、

$$\text{半径} = n \cdot (a/\lambda_0) \quad (\text{単位は } 2\pi/a)$$

の円となるので、作図によってフォトニック結晶 50 側の結合バンドを求めることができる。図 3 においては、第 1 バンドおよび第 2 バンド上に対応点があるので、フォトニック結晶 50 内において第 1 バンドおよび第 2 バンドにそれぞれ対応した波動が伝播することになる。フォトニック結晶 50 内における波動エネルギーの進行方向は等高線の法線方向となるので、いずれのバンドによる伝播光も Z 方向に進む。

【0112】

図 3 の場合について、バンド図を Z 方向に限定して示したものが図 4 である。図 4 に示すように、図 1 に示す入射光 51 の真空中の波長が λ_0 の場合、フォトニック結晶 50 内では第 1 バンド、第 2 バンドに対応する波数ベクトル k_1 、 k_2 が存在する。換言すると、規格化周波数 a/λ_0 の入射光 (平面波) 51 は、

$$\lambda_1 = 2\pi/k_1 \text{ および}$$

$$\lambda_2 = 2\pi/k_2$$

の 2 つの波動としてフォトニック結晶 50 内を Z 方向に伝播する。

【0113】

ここで、真空中での波長 λ_0 を、対応するフォトニック結晶 50 中での波長 (λ_1 , λ_2 など) で除した値を「実効屈折率」と定義する。図 4 から理解できるように、第 1 バンドの規格化周波数 a/λ_0 と波数ベクトル k_z はほぼ比例する

ため、第1バンドでは実効屈折率も入射光51の波長 λ_0 の変化に対してほとんど不変である。しかし、第2バンド以上の高次バンドでは、実効屈折率が λ_0 の変化により大きく変化し、図4から明らかなように実効屈折率が1未満になることもある。

【0114】

また、図4で示すようなバンド曲線を k_z で微分した値（接線の傾き）が伝播光の群速度となることは良く知られている。図4に示す場合、第2バンド以上の高次バンドでは、 k_z の値が小さくなるにつれて接線の傾きは急速に小さくなり、 $k_z=0$ のときその傾きは0となる。これが、フォトニック結晶に特有の群速度異常である。フォトニック結晶における群速度異常は極めて大きく、かつ通常の均質物質の分散とは逆（入射光の波長が長くなるにつれて群速度が遅くなる）なので、高次バンド伝播光の群速度異常を利用して光遅延素子や分散制御素子などの光学素子を作ることができる。

【0115】

以上述べたように、高次バンドによる伝播光（高次バンド伝播光）を利用する光学素子は非常に有用なものである。しかし、第2バンド以上の高次バンド伝播光が伝播する規格化周波数 a/λ_0 の場合に必ず第1バンド伝播光（第1バンドによる伝播光）も伝播している。このことは、図4において、各バンドを示す直線や曲線は実際には同図の右にもっと広がっていることから明らかである。

【0116】

なお、第1バンド伝播光は上述した「非常に大きい波長分散」（周波数の変化に対する伝播光の波長 $(2\pi/k_z)$ の変化が大きくなること）、「群速度異常」といった効果がほとんどない。このため、高次バンド伝播光と第1バンド伝播光とが存在する場合、第1バンド伝播光は、高次バンド伝播光を利用する場合には単なる損失でしかなく、入射光エネルギーの利用効率を大きく低下させてしまうだけでなく、迷光として光学素子のS/N比を低下させる原因ともなる。

【0117】

ところが、本発明者らの研究によって、入射光に位相変調を加えることで、周期的多層膜である1次元フォトニック結晶内を高次バンド伝播光のみを伝播させ

ることが可能であることが明らかになった。また、フォトニック結晶内を Z 方向に進む高次バンド伝播光は、ブリルアンゾーンの境界線上のバンドを利用しても得ることができる、ことが明らかになった。

【0118】

図 5 は、図 1 に示すフォトニック結晶 50 の一端面 50a に入射光 51 が角度 θ で斜め入射する場合の、フォトニック結晶 50 側の結合バンド（フォトニックバンド）を示している。このような斜め入射の場合、フォトニック結晶 50 内を伝播する波動の進行方向は等高線の法線方向となるので 2 種類あり、それぞれ Z 方向にはならない。

【0119】

ところで、一端面 50a への入射角 θ を

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

を満たすように設定すると、ブリルアンゾーンの境界線 100a、100b 上に第 1 バンド伝播光 52₁ と第 2 バンド伝播光（高次バンド伝播光）52₂ とが存在する（図 6 参照）。ブリルアンゾーンの境界線 100a、100b での対称性より、2 つの伝播光 52₁、52₂ の波動エネルギーの進行方向は Z 方向に一致しているので、各伝播光 52₁、52₂ は Z 方向に進行する。

【0120】

Z 方向への伝播を実現するためには、ブリルアンゾーンの Y 方向の周期性より

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 1.0, 1.5, 2.0, \dots$$

を満たす条件でもよいが、値が増えるにつれて n および θ を大きい値とする必要がある、その実現が難しくなる。

【0121】

図 6 の場合について、ブリルアンゾーンの境界線上のバンド図を Z 方向に限定して示したものが図 7 である。図 7 に示すように、図 6 に示すブリルアンゾーンの境界線 100a、100b 上では、第 1 バンドを含む全てのバンドが図 4 に示す高次バンドと同様な変化をなす。したがって、全てのバンドにおいて「実効屈折率の波長による大きな変化」や「群速度異常」が起こるので、これらの特性を利用して光遅延素子や分散制御素子などの光学素子を、入射光エネルギーの利用

効率やS/N比を低下させずに作ることができる。

【0122】

本発明者らの研究によると、フォトニック結晶外部の平面波、例えばフォトニック結晶50（図1参照）に入射する平面波（入射光51）と、フォトニック結晶50内部をZ方向に進む高次伝播光とを結合させるいくつかの方法が明らかとなっているので、以下にその方法について説明する。

【0123】

（1）＜ブリルアンゾーンの中心線上のバンドを利用する場合＞

ここで、「ブリルアンゾーンの中心線上のバンド」とは、フォトニックバンド構造におけるブリルアンゾーンの中心線上に存在するフォトニックバンドをいう。例えば、図3に示すフォトニックバンド構造におけるブリルアンゾーンの中心線60上の第1バンドやブリルアンゾーンの中心線61上の第2バンドが、その中心線上に存在するフォトニックバンドに相当する。

【0124】

周期aのフォトニック結晶（例えば図1に示すフォトニック結晶50）に対して、同じ方向に周期aを有する適当な位相変調波を入射させると、特定の高次バンドに属する伝播光のみを得ることができる。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝播光がフォトニック結晶50の他端面50bから出射された後に適当な位相変調手段を設置することにより、その伝播光を平面波に戻すことができる。

【0125】

例えば、図8に示すように、2方向の平面波62a、62bを交差させて、Y方向に周期aを有する干渉波を作り、そこに図1に示すようなフォトニック結晶50の一端面50aを設置すれば、入射光エネルギーの大部分を高次バンド伝播光にすることができる。なお、図8に示すように、高次バンド伝播光が伝播しているフォトニック結晶50による導波路の左右表面（X方向と垂直な断面）では、「電場パターン」が露出している。図8では、太い実線で示す電場の山98は細い実線99で示す電場の山99よりも振幅が大きいことを示している。また、図8は、フォトニック結晶50を構成する周期的多層膜のうち、屈折率の異なる隣接する各層で電場の山98と電場の山99とが互いに「半波長だけ」ずれてい

ることを示している。

【0126】

高次バンド伝播光の割合を図8の場合よりもさらに大きくするために、図9に示すように、入射させる平面波を図8の場合よりも増やすことも考えられる。例えば、3方向の平面波62a、62b、62cをフォトニック結晶50の一端面50aに入射させる。また、図10に示すように、フォトニック結晶50の一端面50aの直前に周期aの位相格子64を設置し、平面波の入射光51'を位相格子64により位相変調して周期aの位相変調波65を作り、この位相変調波65を入射させる。これにより、図8に示す場合と同様に入射光エネルギーの大部分を高次バンド伝播光とすることができる。この場合の位相格子64は、例えばフォトニック結晶50の一端面50a近くに溝を形成する、という簡便な方法によっても作ることができる。

【0127】

フォトニック結晶50の他端面50bからの出射光は、その他端面50bから直接出射する場合には他端面50bの周期構造による回折が発生する。例えば、図8に示すように、その出射光は、他端面50bの周期構造により回折光66a、66bとなってしまう。しかし、図10に示すようにフォトニック結晶50の一端面50aの直前に設置した周期aの位相格子64と同様の位相格子67を、図9および図10に示すようにフォトニック結晶50の他端面50bの直後に設置することにより、出射光68を位相格子67により平面波69に戻すことができる。

【0128】

(2) <ブリルアンゾーンの境界線上のバンドを利用する場合>

図6および図7に示すような「ブリルアンゾーンの境界線100a、100b上における伝播」を実現する方法として、以下のような方法がある。

【0129】

(2a) 斜め入射による複数バンド伝播

図6および図7に示すように、第1バンドと第2バンドの両方が存在する周波数域において、フォトニック結晶の端面、例えば、図1に示すフォトニック結晶

50の一端面50aに斜め入射する光(入射光51)の入射角 θ を

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

の条件を満たすように設定することにより、第1バンドと第2バンドによる伝播を重ね合わせた波動を得ることができる。この場合、次のような伝播が得られる。

【0130】

○第1バンド伝播光は、図11の左側に示すように、高屈折率層を腹、低屈折率層を節とする。つまり、フォトニック結晶50の高屈折率層104に電場の山106と電場の谷107が存在し、その低屈折率層105に電場の節が存在する。

【0131】

○第2バンド伝播光は、図11の右側に示すように、低屈折率層を腹、高屈折率層を節とし、その周期は第1バンドによる伝播光よりも長い。つまり、フォトニック結晶50の低屈折率層105に電場の山106と電場の谷107が存在し、その高屈折率層104に電場の節が存在し、電場の山106と谷107の周期は第1バンドによる伝播光よりも長い。

【0132】

○第1バンド伝播光と第2バンド伝播光とが重なると、図12に示すように、斜めに進行するように見える「見かけの波面」が発生し、その向きが周期的に入れ換わるようになる。

【0133】

このようにして第1バンドと第2バンドによる伝播を重ね合わせた波動を得る方法は、入射光(平面波)を傾けるだけなので最も簡便である。さらに、 a/λ_0 の値を大きくすれば、第3バンド以上の高次バンドによる伝播光も加えることができる。

【0134】

しかし、本方法では、2種類あるいはそれ以上のバンドによる伝播光が混ざってしまう。これらの伝播光は、フォトニック結晶内の波長や群速度が異なるので、これらの特性が単一であることが必要な光学素子を構成する場合は大きな支障

となる。したがって、本方法は、「伝播光の群速度が遅くなって非線形作用が大きくなるだけで良い」といった用途には特に好適である。

【0135】

(2b) 斜め入射による第1バンドの伝播

図13に示すように、第1バンドのみが存在する周波数域（その周波数に対応する第2バンドが存在しない）において、フォトニック結晶の端面、例えば、図1に示すフォトニック結晶50の一端面50aに斜めに入射する光（入射光51）の入射角 θ を

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

の条件を満たすように設定する。これにより、単一のバンドによる伝播（第1バンド伝播光521）を得ることができる。

【0136】

本方法では、入射光（平面波）を傾けるだけなので、上記（2a）の方法と同様に簡便である。しかし、「第1バンドのみが存在する周波数域」は a/λ_0 の値が小さいので、入射角 θ と屈折率 n を共に大きくする必要があり、フォトニック結晶50の一端面50aでの反射率が相当大きくなりロスが増える点が問題となる。

【0137】

(2c) 平面波の干渉による入射光の位相変調

図14に示すように、同一波長の平面波62a, 62bを、それぞれ入射角 $\pm\theta$ として交差させてフォトニック結晶の端面に入射させると、干渉により節と腹のある電場パターンが形成される。そこで、電場の山106と電場の谷107が高屈折率層104に存在し、節が低屈折率層105に存在するようにフォトニック結晶50を配置すると、図11で示す第1バンドによる伝播の場合と同様に、第1バンドによる伝播光のみが発生する。また、電場の山106と電場の谷107が低屈折率層105に存在し、節が高屈折率層104に存在するようにフォトニック結晶50を配置すると、図11で示す第2バンドによる伝播の場合と同様に、第2バンドによる伝播光のみが発生する。

【0138】

入射角 θ の値が

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

の関係でなければならないことは、図 14 より明らかである。ただし、 n は入射光側の屈折率である。

【0139】

(2d) 位相格子の設置による入射光の位相変調

図 15 に示すように、フォトニック結晶 50 の周期 a の 2 倍の周期 $2a$ を有する位相格子 70 に平面波の入射光 51' を垂直入射させると、+1 次回折光と -1 次回折光との干渉により、図 14 に示す上記 (2c) の方法による「平面波による干渉」の場合と同様な腹（電場の山と谷）と節のある電場パターンを作ることができる。ここで、電場の山 106 と電場の谷 107 が高屈折率層 104 に存在し、節が低屈折率層 105 に存在するようにフォトニック結晶 50 を配置すると、第 1 バンドによる伝播光のみが発生し、電場の山 106 と電場の谷 107 が低屈折率層 105 に存在し、節が高屈折率層 104 に存在するようにフォトニック結晶 50 を配置すると、第 2 バンドによる伝播光のみが発生する。

【0140】

位相格子 70 による 0 次光や 2 次以上の回折光が混じるとフォトニック結晶 50 の特定バンドとうまく結合しないので、+1 次回折光と -1 次回折光が共に 50 % の回折効率となることが理想である。したがって、位相格子 70 は、±1 次回折光ができるだけ強くなるように最適化した形状であることが望ましい。

【0141】

また、位相格子 70 を特定の波長で最適化した場合は、波長が多少変わっても 1 次回折光の効率は急激に低下せず、高いレベルに留まるので、本方法は使用できる波長域を他の方法よりも広くとることができる。

【0142】

なお、図 15 で符号 65' は位相格子 70 による位相変調波である。また、位相格子 70 と同様に周期 $2a$ を有する位相格子 71 をフォトニック結晶 50 の他端面 50b の直後に設置することにより、出射光 68' を平面波 69' に戻すことができる。

【0143】

(2e) 周期 a の位相格子と斜め入射光による干渉波の利用

上記 (2a) の方法により第 1 バンド伝播光と第 2 バンド伝播光とが共存する (重なるような) フォトニック結晶 50 内の伝播光は、位相格子の出射側の端面 (他端面 50b) の位置によって出射する回折光の強度を変えることができる。すなわち、図 16 の位置 H および J で示すように、位相格子の出射側の端面が山谷パターンの斜面にあると、片側の回折光が強くなる。また、図 16 の位置 I で示すように、位相格子の出射側の端面が山谷パターンの頂点あるいは底にあると、両側回折光の強度がほぼ等しくなる。両側回折光の強度がほぼ等しくなる出射光による干渉パターンは、上記 (2d) の方法の場合に位相格子により作り出した干渉波と同様なものなので、位相格子の出射側の端面の直後に位相格子と同じ周期 a のフォトニック結晶を設置すると、特定の高次バンドによる高次伝播光を得ることができる。

【0144】

本方法では、位相格子およびフォトニック結晶として、同じ構造 (当然周期も同じ a) の周期的多層膜などを用いることができるが、干渉波による電場の腹 (山および谷) と節の位置をフォトニック結晶側と合わせるための調整は必要となる。また、

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

の条件を満たすのが望ましいことは言うまでもない。

【0145】

(2f) 周期 $2a$ の位相格子と斜め入射による干渉波の利用

上記 (2d) の方法による場合、 a / λ_0 の値が 0.5 未満になると、例えば、石英／空気といった低屈折率物質で構成した位相格子では、 ± 1 次回折光の強度を大きくするのが困難になってくる。シリコンなどの高屈折率材料で位相格子を構成すれば、 ± 1 次回折光の強度を大きくすることができるが、反射光が多くなるか、あるいは位相格子の作製が困難になるといった問題が生じる。

【0146】

しかし、位相格子の周期をフォトニック結晶の 2 倍の $2a$ とするとともに、

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

の条件に近い斜め入射光とすれば、 a / λ_0 の値が0.5未満の小さい値であっても、図17に示すような干渉波を生じる回折光のペアを強くすることができる。

【0147】

このため、その直後に周期 a のフォトニック結晶を設置すると、特定の高次バンドによる高次伝播光を得ることができる。本方法は、上記(2e)の方法に類似しているが、位相格子の周期が $2a$ (フォトニック結晶の周期の2倍)である点で(2e)の方法とは大きく異なる。

【0148】

次に、周期 $2a$ の位相格子と斜め入射による干渉波の利用による方法における、有限要素法による電磁波シミュレーションの結果を以下に示す。

(フォトニック結晶をなす周期的多層膜の構造)

物質AとBを交互に重ねたもの。

【0149】

(物質K) 厚さ $t_K = 0.30a$ 屈折率 $n_K = 2.1011$

(物質L) 厚さ $t_L = 0.70a$ 屈折率 $n_L = 1.4578$

フォトニック結晶のバンド図は図2に示すものと同じである。

(位相格子の構造)

図17に示す位相格子110は、屈折率 $n = 2.00$ の物質Mの表面に、周期 $2a$ の矩形状の溝111を形成し、その溝111内に屈折率 $n = 1.00$ の空気が入っている構造である。物質Mには、例えば後述する入射角 $\theta = 47.332^\circ$ に合わせた斜めの端面112を設け、この端面112を斜めの入射面としている。また、位相格子110の端面には、屈折率 $n = 2.00$ の物質Nの表面が接している。

【0150】

(物質M) 矩形部分のY方向の厚さ $t_M = 1.6a$ 屈折率 $n_M = 2.00$

(物質N) 矩形部分の空気層のY方向の厚さ $t_N = 0.4a$ 屈折率 $n_N = 1$

. 00

位相格子 110 の Y 方向周期 $2a$

位相格子 110 の、Z 方向の厚さ $= 1.5642a$

なお、位相格子の形状は、特定の回折光が強くなるように最適化した。

(入射光)

(真空中の波長 λ_0) $\lambda_0 = 2.941a$ の TE 偏光 (電場の向きが X 方

向)

$$(a/\lambda_0 = 0.340)$$

(入射角 θ) $\theta = 47.332^\circ$

なお、 $n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$ の条件を満足する。

(位相格子の設置)

位相格子 110 による干渉波を図 17 に示す。両側に広がる干渉波が強く、位相格子 110 と垂直に進む干渉波は弱いので、互い違いの干渉パターンとなっていることがわかる。図 18 に示す構成例では、図 17 に示す構成において、物質 N に代えてフォトニック結晶 50 を用い、位相格子 110 とフォトニック結晶 50 を $0.90909a$ の間隔で配置し、その隙間に屈折率 $n = 2.0$ の媒体 113 を充填している。そして、フォトニック結晶 50 の高屈折率層の中心に干渉波の腹 (電磁波の山と谷) がくるように位相格子 110 の Y 方向位置を調整した。フォトニック結晶 50 の一端面の入射部分の幅は約 24 周期とした。このような構成例のシミュレーション結果を図 18 に示す。

【0151】

本シミュレーションでは、 a/λ_0 の値が小さいので、フォトニック結晶中を伝播する電磁波の波長は非常に長くなっている。

(2g) 斜め端面の利用

ブリルアンゾーンの境界線上の伝播光は、フォトニック結晶の入射側の端面を斜めの端面とし、その斜めの端面に平面波を入射させることによって得ることができる。

【0152】

図 19 (A) に示すように、フォトニック結晶 50 の斜めの端面 (角度 Ψ_1) 50c に入射角 θ_0 の入射光 (平面波) 80 を入射させると、結合バンドの位置

P (図 19 (B) 参照) を作図によって求めることができる。その位置 P がブリルアンゾーンの境界線上にくるように Ψ_1 と θ_0 を調整すれば、Z 方向に進行する高次伝播光 81 が得られる。

【0153】

以上述べた (2a) ~ (2g) の方法により、1次元フォトリック結晶内に、ブリルアンゾーンの境界線上のバンドを利用する高次バンド伝播光を効率良く形成することができる。また、伝播光をフォトリック結晶の垂直な端面から均質物質中に出射させると、著しい回折が生じて取り扱いに不便である。しかし、上述した (2d) ~ (2g) の方法で用いた入射側の位相格子を逆向きにして出射側の端面に設置したり、あるいは出射側の端面を入射側の斜め端面とは逆向きの斜め端面にすれば、出射光を平面波に戻すことができる。これにより、光ファイバなどとの結合が容易になる。

【0154】

以下、本発明の各実施形態について説明する。

[第1実施形態]

以上説明した1次元フォトリック結晶を用いて例えば図20に示すような光学素子を設計する場合は、導波路形状とすると、光ファイバーとの接続や、上記特性(「非常に大きい波長分散」や「群速度異常」)を制御するための電極の設置などがやりやすいので望ましい。

【0155】

図20に示す光学素子は、図21に示す第1実施形態に係るフォトリック結晶導波路200を用いて構成したものである。このフォトリック結晶導波路200は、適当な基板90上に、1次元フォトリック結晶をコアとして導波路形状に形成されている。フォトリック結晶導波路200のコアを構成するフォトリック結晶には、図1に示すフォトリック結晶50と同じ符号を用いて重複した説明を省略する。

【0156】

図20に示す光学素子は、平面波の入射光94をロッドレンズ95などのレンズ部材により位相格子92の端面に平行光束にして入射させ、フォトリック結晶

50によるコアに結合する。この光は、フォトニック結晶導波路200のフォトニック結晶50内を伝播し、位相格子93およびロッドレンズ96などのレンズ部材を介して出射光97となる。位相格子92, 93は、図10に示す上記位相格子64, 67と同様のものである。なお、以下の説明で「1次元フォトニック結晶50」は、単に「フォトニック結晶50」という。

【0157】

フォトニック結晶導波路200は、一方向（周期方向であるY方向）にのみ周期性を有する1次元フォトニック結晶50により構成され、その一方向に垂直な方向（本例では「Y方向に垂直なXZ平面方向」）に電磁波（伝播光52）が伝播するコア201と、クラッド層としてのクラッド202とを備えている。本例で「一方向に垂直な方向」とは、周期方向であるY方向に垂直なXZ平面と平行なあらゆる方向（XZ平面方向）をいう。

【0158】

コア201を構成する1次元フォトニック結晶50は、図21および図22に示すように、厚さ t_A の物質A（屈折率 n_A ）と厚さ t_B の物質B（屈折率 n_B ）を交互に積み重ねた周期 $a = (t_A + t_B)$ をもった周期的多層膜である。

【0159】

クラッド202は、コア201の周期方向（一方向）に垂直な両側表面に、フォトニック結晶50と同じ方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、コア201内を伝播する電磁波が周期方向に垂直な表面（上下の表面）から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドである。

【0160】

このようなフォトニック結晶導波路200を構成するには、上下方向（Y方向）および左右方向（X方向）への、光の閉じ込めが必要となる。この第1実施形態では、フォトニック結晶50の上述したブリルアンゾーンの境界線上のフォトニックバンドを利用する伝播光について、各方向の閉じ込め条件を以下に述べる。

（Y方向のモード）

図21および図22に示すフォトニック結晶50において、規格化周波数 a/λ

λ_0 に対応する第 1 バンド (YZ 平面内、X 座標は 0) による Z 方向の伝播光について考える (図 23 参照)。

【0161】

図 23 に示す第 1 バンド上の点 $(0, k_y, k_z)$ による伝播光の波数ベクトルは、

$$\mathbf{k} = (0, k_y, k_z)$$

である。フォトリック結晶 50 中に形成される波面は \mathbf{k} と垂直であり、その波長 λ と伝搬角 ϕ は、

$$\lambda = 2\pi / |\mathbf{k}| = 2\pi / (k_y^2 + k_z^2)^{0.5} \quad \dots (1\text{式})$$

$$\tan \phi = k_y / k_z \quad \dots (2\text{式})$$

で表わされる。

【0162】

ここで、コア 201 となるフォトリック結晶 50 の周期を a 、高屈折率層の数は $(m+1)$ とする (図 24 参照)。

コア 201 を伝播する波動の位相整合条件は、

$$2A |\mathbf{k}| \sin \phi = \Phi + \pi N \quad (N=0, 1, 2, 3 \dots) \quad \dots (3\text{式})$$

である。ただし、 $2A$ はコア 201 の厚さ (コア厚さ) である。(参考: 國分泰雄著「光波工学」共立出版 48 頁)

Φ はコア 201 とクラッド 202 の界面での位相変化量であるが、今注目すべきブリルアンゾーンの境界線上の第 1 バンド伝播光では、高屈折率層の中心に電場の腹がくるので、

$$\Phi = 0 \quad \dots (4\text{式})$$

コア厚さ $2A$ は、

$$2A = am \quad \dots (5\text{式})$$

と単純化することができる。

【0163】

(3 式) に (1 式), (2 式), (4 式) および (5 式) を代入して整理すると、

$$k_y = N\pi / ma \quad \dots (6\text{式})$$

を満たすバンド上の点が、位相整合条件を満たす伝播光、すなわちモードとなる。図 25 に示すように、モードは $N=0$ の 0 次モードから $N=m$ の m 次モードまで存在し、

ブリルアンゾーンの中心線上の伝播光 : 0 次モード

ブリルアンゾーンの境界線上の伝播光 : m 次モード

となる。もっとも、 ϕ が 0 に近い低次モードの場合は (4 式) の仮定が不正確であると考えられるが、ブリルアンゾーンの境界線付近の m 次に近い高次モードに関しては充分であるとする。

【0164】

規格化周波数 a/λ_0 に対応する第 2 バンドが存在する場合にも同様に、コア 201 をなす低屈折率層の数を $m+1$ とすると、 m 個のモードが存在する (図 26 参照)。

(Y 方向の閉じ込めと単一モード条件)

通常の単一モード導波路の場合は第 1 バンドにおける $N=0$ の 0 次モードのみを伝播させるが、本発明の構成ではブリルアンゾーンの境界線上の m 次モードを伝播させる。伝播モードの Z 方向における上述した実効屈折率が上下の媒体の屈折率よりも大きい場合は、そのまま屈折率差による閉じ込めが可能である。しかし、実効屈折率が小さければ屈折により伝搬光が媒体側に漏れてしまう。特に、高次モード光の Z 方向実効屈折率が 1 未満になると、媒体を空気としても漏れを防ぐことができなくなる。そのような場合は、図 21 に示す本例のように上下のクラッド 202 もフォトニック結晶として PBG (フォトニックバンドギャップ: 以下、「PBG」という。) による閉じ込めを行なう。

【0165】

図 27 は、周期 a のコア 201 に隣接して、コア 201 と同じ構成で周期 b ($a < b$) のクラッド 202 をつけた場合についてのバンド図を示したものである。クラッド 202 の周期がコア 201 よりわずかに大きいので、同じ規格化周波数に対応するクラッド 202 の PBG がコア 201 の第 1 バンド上のモード $N=m$ と $N=(m-1)$ にかかり、この 2 つのモードだけが閉じ込められていることがわかる。周期 a と b の差を小さくしていくと PBG がより左に移動するので、

m次モードだけの単一モード条件にすることができる。理論的には、コア201のモード数が多くなってm次モードと(m-1)次モードがバンド図上でどんなに接近してきても、aとbを近づけることによって単一モード条件とすることができる。しかし、発明者らのシミュレーションによると、aとbをあまり接近させると閉じ込め作用が弱くなり、十分な閉じ込めを行うためにはクラッド202の周期数が10周期を超えて実用的ではなくなってしまう。したがって、実際の導波路を設計するにあたっては、

- ・クラッド202の周期数の実用的な上限
- ・十分な閉じ込めが可能なaとbの間隔
- ・コア201の周期数

などの条件のバランスが取れた構成とする必要がある。また、図26に示すような、第2バンドのブリルアンゾーンの境界線上にあるモードを利用する場合は、クラッド202の周期をコア201より幾分小さくしてPBGを左にずらせばよい。

【0166】

クラッド202のPBGの位置を調節して単一モード条件を実現するためには、

・コア201と同じ構成で周期のみ異なる多層膜をクラッド202とする方法のほかに、

・コア201とクラッド202の周期を同じとして、多層膜を構成する2種の媒体の膜厚比を異なったものとする、

・コア201とは異なる媒体の組合わせのクラッド202とする、

・1周期が3層以上で構成させるフォトリック結晶50とする、

といった方法を単独あるいは複合して用いることも、もちろん可能である。

【0167】

バンド図による閉じ込めの判定は、無限周期構造を前提としたものであるから、クラッド202の閉じ込め用フォトリック結晶の周期数がたとえば3周期くらいであると、閉じ込めが不十分となり伝搬光が外部に漏れてしまうことがある。もちろん、不必要に周期数を多くすることはコストと多層膜の耐久性や精度の点

から好ましくない。実際に必要な最低限の周期数は、実験や電磁波シミュレーションにより決定することが望ましい。

(XZ方向のモード)

Y方向においては、ブリルアンゾーンの境界線にあるm次モードのみが1次元フォトリック結晶中に存在している単一モード条件を仮定して、この伝搬光のXZ平面での閉じ込めについて考える。図28は、Y方向m次モードのバンドを、逆空間のXZ方向に示したものである。XZ方向には構造がないので、フォトリックバンドは円となる。波数ベクトルは、

$$\mathbf{k} = (k_x, \pi/a, k_z)$$

であり、図28の円の半径

$$(k_x^2 + k_z^2)^{0.5}$$

は、一定値である。

【0168】

ここで、1次元フォトリック結晶矩形導波路であるフォトリック結晶導波路200内を「Y方向m次」の波動がZ方向方向に進む場合を考える(図29参照)。フォトリック結晶導波路200の側面(YZ平面と平行)には、市松模様の電場パターンが露出しており、側面は屈折率 n_s の均質媒体(外部媒体)と接しているものとする。図29より、側面には

(a) 周期 $2a$

(b) 周期 λ

(c) 周期 $a\lambda / (\lambda^2/4 + a^2)^{0.5}$

に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。ところが、

(a), (b) の場合は同じ波面上に同じ強度の山と谷が交互にならんでいるため、打ち消しあって波面は消滅する。換言すると、漏れ光は生じない。従って、漏れ光が生じるのは(c)の波面が

$$\lambda_0/n_s < a\lambda / (\lambda^2/4 + a^2)^{0.5}$$

の条件を満たす場合に限られる。

【0169】

図30は、さらに一般的に伝搬光がZ方向に対して伝搬角 ϕ だけ傾いて進行す

る場合である。この場合でも同様に、

(a) 周期 $2a$

(b) 周期 $\lambda / \cos \phi$

(c) 周期 $a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5}$

に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性があるが、漏れ光が生じるのは (c) の波面が

$$\lambda_0 / n_s < a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5} \quad \dots (7 \text{ 式})$$

の条件を満たす場合に限られる。

【0170】

次に XZ 平面内でのモードについて考える。コア 201 の X 方向の導波路幅を $2L$ とすると、位相整合条件は図 31 より、

$$2L (2\pi / \lambda) \sin \phi = \Phi + \pi N \quad (N = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad \dots (8 \text{ 式})$$

となる。位相変化量 Φ は、 $0 \sim \pi$ の間にあるので

$$\Phi = \pi s, \quad 0 \leq s \leq 1$$

とにおいて (8 式) を変形すると、

$$2L = (s + N) \lambda / (2 \sin \phi)$$

となる。

【0171】

閉じ込めがなされる伝搬角 ϕ の最大値を ϕ_0 とすると、0 次および 1 次のモードが存在するための $2L$ の範囲は、

$$0 \text{ 次モードが存在} : 2L \geq s \lambda / 2 \sin \phi_0$$

$$1 \text{ 次モードが存在} : 2L \geq (1 + s) \lambda / 2 \sin \phi_0$$

となる。

【0172】

伝搬角 ϕ と位相変化量 Φ の関係がわかれば、上記の式における $2L$ の範囲は求めることができる。ところが、 ϕ と Φ の関係は単純なスラブ導波路の場合は既知であるが、本発明のようなフォトニック結晶中の伝播光については明らかになっ

ていない。しかし、後述するシミュレーション結果において、伝播光の電場は導波路の境界面外で急速に弱くなっているため、0次、1次といった ϕ の比較的小さいモードにおいては ϕ は π に近い値であると考えられる。特定の ϕ_0 に対して、0次モードのみ存在する領域、すなわち単一モード条件を満たす $2L$ の範囲（シングルモード領域）は、模式的に図32のように表わされる。図32より導波路幅 $2L$ が単一モード条件を満たすための必要条件は、

$$0 \leq 2L < \lambda / \cos \phi_0$$

であり、

$$2L = \lambda / 2 \cos \phi_0$$

が充分条件であることがわかる。

【0173】

(7式)より、伝搬角 ϕ の波動の閉じ込めについては、関数

$$f(\phi) = a(\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5} - (\lambda_0 / n_s) \quad \dots (8式)$$

により判定することができる。 $f(\phi)$ が負であれば伝播する波動はフォトニック結晶導波路200のコア201内に閉じ込められ、 $f(\phi)$ が正であればコア201の側面からの漏れ光となる。

【0174】

以下の条件、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a / \lambda_0 = 0.28$$

$$\lambda_0 / \lambda = n_{eff} = 0.30$$

$$n_s = 1.45$$

において、伝搬角 ϕ を横軸とし、

$$f(\phi)$$

$$2L = \lambda / (2 \sin \phi)$$

$$2L = \lambda / \sin \phi$$

を縦軸にプロットしたグラフが図33である。ただし、 $f(\phi)$ は正負のみが問題なので、10倍に拡大して表記している。

【0175】

図33においては、 $f(\phi)$ が常にマイナスなので、 ϕ の値にかかわらず伝播光はコア201の側面から外に出て行くことができず、完全な閉じ込め状態となる。この場合、閉じ込めがなされる ϕ の最大値 ϕ_0 は 90° であるので、単一モード条件を満たす $2L$ の範囲（シングルモード領域）は $\phi = 90^\circ$ の線上にある（図32参照）。また、 $2L$ が単一モード条件の範囲より大きくなると、伝播モードの数は多くなるが側面からの漏れ光は発生しない。

【0176】

図34は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a/\lambda_0 = 0.50$$

$$\lambda_0/\lambda = n_{\text{eff}} = 1.1$$

$$n_s = 1.45$$

の場合である。図34においては、 ϕ が 17.3° 以上になるとコア201の側面からの漏れ光が発生する。従って、単一モード条件を満たす領域（シングルモード領域）は、 $\phi_0 = 17.3^\circ$ の場合での範囲となる。なお、単一モード条件の限界となる ϕ_0 の値は、 n_s の値を動かすことによって調整することができる。

【0177】

図35は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a/\lambda_0 = 0.70$$

$$\lambda_0/\lambda = n_{\text{eff}} = 1.40$$

$$n_s = 1.60$$

の場合である。図35においては、 $f(\phi)$ の値が常にプラスの値なので、 $2L$ の値にかかわらず0次を含むすべてのモードが漏れ光となり、長距離を伝播させることができない。

【0178】

以上のように構成された第1実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

以上の結果をまとめると、フォトニック結晶導波路 200 は、XZ 方向の閉じ込めの強さによって以下のような種類の導波路を作ることができる。

【0179】

(1) 「完全閉じ込め単一モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○完全閉じ込め条件

$$f(90^\circ) = 2a - (\lambda_0 / n_s) < 0$$

を満たす。

【0180】

○導波路幅 $2L$ は、伝搬角 ϕ が $\phi = 90^\circ$ の場合において位相整合条件 (7 式) における 0 次モード ($N=0$) のみ存在する範囲

$$s\lambda/2 \leq 2L < (s+1)\lambda/2$$

にある。ただし、コア 201 内を伝搬する波動が、コア 201 の側面で閉じ込めがなされる伝搬角 ϕ の最大値である ϕ_0 が $\phi_0 = 90^\circ$ をもってその側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0181】

このような「完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

- ・単一モード伝播のまま急激曲げが可能で、導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。

【0182】

- ・完全な閉じ込めとなるのは、 a/λ_0 が 0.5 未満という小さい値に対応し、 n_{eff} が比較的小さく、分散や群速度異常の大きい領域となる。従って、分散や群速度異常といった特性が大きいことが望ましい、機能性導波路に適している。群速度が遅い (分散が大きい) 領域であれば、非線形作用が増強されるので、非線形作用を利用する光学素子の特性を大きくする、あるいは光路長を短縮することができる。

【0183】

(2) 「完全閉じ込め多モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「完全閉じ込め多モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○完全閉じ込め条件

$$f(90^\circ) = 2a - (\lambda_0 / n_s) < 0$$

を満たす。

【0184】

○導波路幅 $2L$ は、伝搬角 ϕ が $\phi = 90^\circ$ の場合において位相整合条件 (7 式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$(s+1)\lambda/2 \leq 2L$$

にある。ただし、コア 201 内を伝搬する波動が、前記伝搬角の最大値 $\phi_0 = 90^\circ$ をもってその側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0185】

このような「完全閉じ込め多モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝搬角 ϕ によらず光がコア 201 内に閉じ込められるので、共振器などに適する。

【0186】

・導波路幅は一定である必要も無く、上限も無いので、自由な形状の共振器とすることができる。

・群速度が遅い (分散が大きい) 領域であれば、非線形作用が増強されるので、非線形作用を利用する光素子の特性を大きくすることができる。共振器と組み合わせてレーザー発振などを行うこともできる。

【0187】

(3) 「不完全閉じ込め単一モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「不完全閉

じ込め単一モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

$$\begin{aligned} \circ f(\phi) = a(\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} > 0.5 \\ - (\lambda_0 / n_s) = 0 \end{aligned}$$

を満たす前記伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) が存在する。

【0188】

○導波路幅 $2L$ は、伝搬角 ϕ が $\phi = \phi_0$ ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) の場合において位相整合条件 (7式) おける 0 次モード ($N=0$) のみ存在する範囲

$$s \lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1) \lambda / 2 \cos \phi_0$$

にある。ただし、コア 201 内を伝搬する波動が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) をもってコア 201 の側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0189】

このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

- ・伝搬角 ϕ によっては漏れ光の発生する条件であるが、導波路幅 $2L$ を充分小さくとっているので単一モード条件となる。

【0190】

- ・伝搬角 ϕ が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0191】

- ・不完全な閉じ込めとなるのは、 a/λ_0 が完全閉じ込め条件よりも大きい値に対応し、 n_{eff} が比較的大きく、分散や群速度異常の小さい領域となる。従って、分散や群速度異常といった特性が小さいことが望ましい、単純な導波路に適している。

【0192】

(4) 「不完全閉じ込め多モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「不完全閉

「閉じ込め多モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

$$\sin \phi_0 = a (\lambda / c \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 c \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5} - (\lambda_0 / n_s)$$

を満たす ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) が存在する。

【0193】

○導波路幅 $2L$ は、伝搬角 ϕ が $\phi = \phi_0$ ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) の場合において位相整合条件 (7式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$(s+1) \lambda / 2 c \cos \phi_0 \leq 2L$$

にある。ただし、コア 201 内を伝搬する波動が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) をもってコア 201 の側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0194】

このような「不完全閉じ込め多導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝搬角 ϕ が ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) 以下であれば閉じ込めがなされているが、導波路幅 $2L$ が大きいので複数のモードが伝播する可能性がある。

【0195】

・伝搬角 ϕ が ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生じるので、急激な曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0196】

・単一モード伝播にはならないが、導波路幅が広いので外部平面波との結合が容易になる。単一モード伝播が特に必要ではない、たとえばダイテクタに光を導く導波路などに利用することができる。

[第2実施形態]

次に、上記第1実施形態で説明した図21および図22に示すフォトニック結晶導波路200についての、ブリルアンゾーン中央のバンドを利用する伝播光について、各方向の閉じ込め条件についても以下に述べる。

(Y方向のモード)

上述した「ブリルアンゾーンの境界線上のバンド」を用いる伝播と異なり、伝播モードは、図26に示す第2バンドの、 $N=0$ の0次モードである。図25に示す「第1バンドの0次モード」は、その特性が通常の平面波に近いので、用いない。

(Y方向の単一モード条件)

伝播モードの上記実効屈折率が、上下のクラッド媒体の屈折率よりも大きい場合は、そのまま屈折率差による閉じ込めが可能であるが、実効屈折率が小さければ、図21に示すフォトニック結晶導波路200のようにクラッド202もフォトニック結晶としてPBGによる閉じ込めを行なう必要がある(図36参照)。具体的な条件については、「ブリルアンゾーンの境界線上の伝播」の場合と同様である。なお、第2バンドと第3バンドは図36に示すような関係にあるが、フォトニック結晶50の構成によっては第2バンドと第3バンドが重なり、PBGが存在しない場合もある。

(XZ方向のモード)

図37に示す様に、フォトニック結晶導波路200のコア201の側面(YZ平面と平行)には、ブリルアンゾーンの境界線上での伝播と同様に市松模様の電場パターンが露出しているが、Y方向の周期は a であり、高屈折率層の電場と低屈折率層の電場は強さが異なり、非対称な関係にある。側面は屈折率 n_s の均質媒体と接していて、伝搬光がZ方向に対して伝搬角 ϕ だけ傾いている場合は、

(a) 周期 a

(b) 周期 $\lambda / \cos \phi$

(c) 周期 $a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5}$

に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。(a)は互いに打ち消されるが、(b)は非対称性によって波面が発生する。従って、漏れ光が生じる可能性があるのは(b)と(c)であり、

$$\lambda_0 / n_s < \lambda / \cos \phi$$

$$\lambda_0 / n_s < a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5}$$

のいずれかの条件が満たされれば漏れ光が生じる。ただし、後者の式が成り立つ

場合は前者も必ず成り立つので、実際には前者の式のみで漏れ光の発生は判定できる。

【0197】

伝搬角 ϕ の波動の閉じ込めについては、関数

$$g(\phi) = \lambda / \cos \phi - (\lambda_0 / n_s)$$

により判定することができる。 $g(\phi)$ の両方が負であれば波動はフォトニック結晶導波路 200 のコア 201 内に閉じ込められ、少なくとも片方が正であればコア 201 の側面から漏れ光となる。ここで、関数 $g(\phi)$ は、伝搬角 ϕ が 90° に近づくと必ずプラスになる ($+\infty$ に発散する) ので、 ϕ によらない完全閉じ込めは不可能であることがわかる。

【0198】

また、XZ 平面内でのモードは、「ブリルアンゾーンの境界線上の伝播」の場合と同様に定義できる。

図 38 は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a / \lambda_0 = 0.90$$

$$\lambda_0 / \lambda = n_{\text{eff}} = 1.2$$

$$n_s = 1.00$$

の場合である。図 38 においては、伝搬角 ϕ が 34° 以上になるとコア 201 の側面からの漏れ光が発生する。従って、単一モード条件を満たす領域 (シングルモード領域) は、伝搬角 ϕ が 34° 以下の範囲となる。なお、単一モード条件の限界となる伝搬角 ϕ の値は、

n_s の値を動かすことによって調整することができる。

【0199】

図 39 は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a / \lambda_0 = 0.80$$

$$\lambda_0 / \lambda = n_{\text{eff}} = 0.80$$

$$n_s = 1.45$$

の場合である。図 39 おいては、 $g(\phi)$ が常にプラスの値なので、 $2L$ の値にかかわらず 0 次を含むすべてのモードが漏れ光となり、長距離を伝播させることができない。

【0200】

以上のように構成された第 2 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

以上の結果をまとめると、フォトニック結晶導波路 200 は、XZ 方向の閉じ込めの強さによって以下のような種類の導波路を作ることができる。

【0201】

(1) 「不完全閉じ込め単一モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「不完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○数式

$$g(\phi) = \lambda / \cos \phi - (\lambda_0 / n_s) = 0$$

となる伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) が存在する。

【0202】

○導波路幅 $2L$ は、伝搬角 ϕ が $\phi = \phi_0$ ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) の場合において位相整合条件 (7 式) における 0 次モード ($N=0$) のみ存在する範囲

$$s\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1) / 2 \cos \phi_0$$

にある。ただし、コア 201 内を伝搬する波動が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) をもってコア 201 の側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、

$0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0203】

このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝搬角 ϕ によっては漏れ光の発生する条件であるが、導波路幅 $2L$ を充分小さくとっているため単一モード条件となる。

【0204】

・伝搬角 ϕ が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0205】

・ a/λ_0 を小さくすると、分散や群速度異常の大きい領域となる。従って、機能素子に適している。

(2) 「不完全閉じ込め多モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「不完全閉じ込め多モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○数式

$$g(\phi) = \lambda / \cos \phi - (\lambda_0 / n_s) = 0$$

となる伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) が存在する。

【0206】

○導波路幅 $2L$ は、伝搬角 ϕ が $\phi = \phi_0$ ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) の場合において位相整合条件 (7 式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$(s+1) \lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L$$

にある。ただし、伝搬する波動が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) をもって側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0207】

このような「不完全閉じ込め多モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・導波路幅 $2L$ は、1 次以上のモードが存在する大きさである。

【0208】

・伝搬角 ϕ が ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0209】

・単一モード伝播にはならないが、導波路幅が広いので外部平面波との結合が容易になる。単一モード伝播が特に必要ではない、たとえばダイテクタに光を導く導波路などに利用することができる。

【0210】

[第3実施形態]

次に、本発明を、コア部分を均質物質とした導波路に適用した第3実施形を説明する。本実施形態に係る均質媒体導波路300は、図40に示すように、一方向（Y方向）に有限な厚さを有する屈折率 n_0 の均質物質により構成され、前記一方向に垂直な方向（XZ平面方向）に電磁波が伝播するコア301と、クラッド312とを備えている。

【0211】

クラッド312は、コア301のY方向（一方向）に垂直な両側表面に、Y方向に周期性を有する1次元フォトニック結晶により構成され、コア301内を伝播する電磁波がY方向に垂直な表面（上下の表面）から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドである。

【0212】

このような均質媒体導波路300を構成する場合にも、上下方向（Y方向）および左右方向（X方向）への、光の閉じ込めが必要となる。

以下、均質媒体導波路300についての、Y方向の高次モードを利用する伝播光について、各方向の閉じ込め条件を以下に述べる。

【0213】

屈折率 n_0 の均質物質により構成されたコア301のY方向の厚さは $2B$ であり、前記両側表面にクラッド312が設けられている。コア301中の波面の伝搬角を ψ とする（図40参照）。コア301を伝播する波動の位相整合条件は、

$$2B(2\pi n_0/\lambda_0) \sin \psi = \Phi + \pi N \quad (N=0, 1, 2, 3\cdots)$$

である。位相変化量 Φ は、 $0 \sim \pi$ の間にあるので

$$\Phi = \pi s, \quad 0 \leq s \leq 1$$

とおくと、モードの伝搬角 ψ は

$$\sin \psi = \lambda_0 (s + N) / 4Bn_0$$

となり、コアのバンド図(単純な円となる)におけるモードは図41の様に分布する。図41はモードが4個存在する場合である。コアの厚さ $2B$ が厚くなるとモード数が増加する。

【0214】

クラッド312を n_0 より屈折率の低い均質物質とすると、低次側のモードしか閉じ込めることができない。しかし、上述した1次元フォトニック結晶によりクラッド312を構成し、そのフォトニックバンドギャップを閉じ込めに用いると、図41に示すように特定の高次モードのみ閉じ込めることが可能となる。

(XZ方向のモード)

Y方向においては、ブリルアンゾーンの境界線上にある単一の高次モード(Y方向モードの伝搬角 ψ 、XZ平面内の波長 $\lambda = \lambda_0 / n_0 \cos \psi$)のみがコア301中に存在している単一モード条件を仮定して、コア301内での伝搬光のXZ平面での閉じ込めについて考える。コア301内をZ方向に進行する高次モード伝播光をY方向と平行な断面で見ると、市松模様の電場パターンが露出していることは、上記第1および第2実施形態のフォトニック結晶によるコアの場合と同様である(図42参照)。高次モード伝播光が導波路の長さ方向に対して伝搬角 ϕ だけ傾いて進行する場合、

(a) 周期 $\lambda_0 / (n_0 \sin \psi)$

(b) 周期 $\lambda_0 / (n_0 \cos \psi \cos \phi)$

(c) 周期 $\lambda_0 / \{n_0 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi)\}^{0.5}$

に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。しかし、漏れ光が生じるのは(c)の波面が、次の数式

$$\lambda_0 / n_s < \lambda_0 / \{n_0 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi)\}^{0.5}$$

を変形した

$$n_s > n_0 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi)^{0.5} \quad \dots (9式)$$

の条件を満たす場合に限られる。

【0215】

次に、XZ平面内でのモードについて考える。図40に示すコア301のX方向の導波路幅を $2L$ とすると、位相整合条件は、

$$2L(2\pi/\lambda)\sin\phi = \Phi + \pi N \quad (N=0, 1, 2, 3\cdots)$$

となる(図31参照)。

【0216】

位相変化量 Φ は、 $0\sim\pi$ の間にあるので

$$\Phi = \pi s, \quad 0 \leq s \leq 1$$

とおいて式を変形すると、

$$2L = (s+N)\lambda / (2\sin\phi)$$

となる。

【0217】

上述したように、特定の ϕ_0 に対して、0次モードのみ存在する領域、すなはち単一モード条件を満たす $2L$ の範囲は、模式的に図32のように表われる。図32より導波路幅 $2L$ が単一モード条件を満たすための必要条件は、

$$0 < 2L < \lambda / \sin\phi$$

であり、

$$2L = \lambda / 2\sin\phi$$

が充分条件であることがわかる。

【0218】

(9式)より、伝搬角 ϕ に基づく波動の閉じ込めについては、関数

$$h(\phi) = n_s - n_0(\sin^2\psi + \cos^2\psi \cos^2\phi) \quad 0.5$$

により判定することができる。 $h(\phi)$ が負であればコア301内を伝播する波動はコア301内に閉じ込められ、 $h(\phi)$ が正であればその波動はコア301の側面からの漏れ光となる。

【0219】

以下の条件、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$\psi = 56^\circ$$

$$n_s = 1.45$$

$$n_0 = 1.00$$

において、伝搬角 ϕ を横軸とし、

$$h(\phi)$$

$$2L = \lambda / (2 \sin \phi)$$

$$2L = \lambda / \sin \phi$$

を縦軸にプロットしたグラフが図43である。ただし、 $h(\phi)$ は正負のみが問題なので、1000倍に拡大して表記している。

【0220】

図43においては、 $h(\phi)$ が常にマイナスなので、 ϕ の値にかかわらず伝播光は側面から外に出て行くことができず、完全な閉じ込め状態となる。この場合、閉じ込めがなされる ϕ の最大値 ϕ_0 は 90° であるので、単一モード条件を満たす $2L$ の範囲（シングルモード領域）は $\phi=90^\circ$ の線上にある（図43参照）。また、 $2L$ が単一モード条件の範囲より大きくなると、伝播モードの数は多くなるが側面からの漏れ光は発生しない。

【0221】

図44は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$\phi = 50^\circ$$

$$n_s = 1.55$$

$$n_0 = 1.45$$

の場合である。図44においては、伝搬角 ϕ が 33.4° 以上になると側面からの漏れ光が発生する。従って、単一モード条件を満たす領域（シングルモード領域）は、伝搬角の最大値 ϕ_0 が $\phi_0 = 33.4^\circ$ に対応する範囲となる。なお、単一モード条件の限界となる伝搬角の最大値 ϕ_0 の値は、 n_s の値を動かすことによって調整することができる。

【0222】

また、 $n_s > n_0$ であれば、伝搬角の最大値 ϕ_0 の値は必ず存在する。 $n_s < n_0$ にすると、伝搬角 ϕ が常にプラスの値なので、 $2L$ の値にかかわらず0次を含むすべてのモードが漏れ光となり、長距離を伝播させることができない。

【0223】

図45は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$\phi = 50^\circ$$

$$n_s = 1.00$$

$$n_0 = 1.45$$

の場合である。図45においては、 $h(\phi)$ が常にマイナスなので、 ϕ の値にかかわらず伝播光は側面から外に出て行くことができず、完全な閉じ込め状態となる。この場合、伝搬角の最大値 ϕ_0 は ($\phi_0 = 90^\circ$) であるので、単一モード条件を満たす $2L$ の範囲は $\phi = 90^\circ$ の線上にある (図43参照)。また、 $2L$ が単一モード条件の範囲より大きくなると、伝播モードの数は多くなるが側面からの漏れ光は発生しない。

【0224】

以上のように構成された第3実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

以上の結果をまとめると、図40に示す均質媒体導波路300は、XZ方向の閉じ込めの強さによって以下のような種類の導波路を作ることができる。

【0225】

(1) 「完全閉じ込め単一モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路200を「完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○完全閉じ込め条件

$$h(90^\circ) = n_s - n_0 \sin \phi < 0$$

を満たす。

【0226】

○導波路幅 $2L$ は伝搬角 ϕ が $\phi = 90^\circ$ の場合において位相整合条件 (7式) における0次モード ($N=0$) のみ存在する範囲

$$s\lambda/2 \leq 2L < (s+1)\lambda/2$$

にある。ただし、コア301内を伝搬する波動が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($\phi_0 = 90^\circ$) をもってコア301の側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0227】

このような「完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・単一モード伝播のまま急激曲げが可能。導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。

【0228】

(2) 「完全閉じ込め多モード導波路」

(必要条件)

○完全閉じ込め条件

$$h(90^\circ) = n_s - n_0 \sin \phi < 0$$

を満たす。

【0229】

○導波路幅 $2L$ は伝播角 ϕ は $\phi = 90^\circ$ の場合において位相整合条件 (7 式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$s\lambda/2 \leq 2L$$

にある。ただし、コア 301 内を伝搬する波動が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($\phi_0 = 90^\circ$) をもってコア 301 の側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0230】

このような「完全閉じ込め多モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝搬角 ϕ によらず光が閉じ込められるので、共振器などに適する。導波路幅は一定である必要も無く、上限も無いので、自由な形状の共振器とすることができる。

【0231】

(3) 「不完全閉じ込め単一モード導波路」

(必要条件)

$$\circ h(\phi) = n_s - n_0 (s \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cos^2 \phi) > 0.5$$

を満たす伝播角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) が存在する。

・導波路幅 $2L$ は、伝播角 ϕ が $\phi = \phi_0$ ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) の場合において位相整合条件 (7 式) における 0 次モード ($N=0$) のみ存在する範囲

$$s\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1) / 2 \cos \phi_0$$

にある。ただし、コア 301 内を伝搬する波動が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) をもってコア 301 の側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0232】

このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝搬角 ϕ によっては漏れ光の発生する条件であるが、導波路幅 $2L$ を充分小さくとっているので単一モード条件となる。

【0233】

・伝搬角 ϕ が ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0234】

(4) 「不完全閉じ込め多モード導波路」

(必要条件)

$$0 < h(\phi) = n_s - n_0 \{ \sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi \} < 0.5$$

を満たす伝播角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) が存在する。

【0235】

○導波路幅 $2L$ は、伝播角 ϕ が $\phi = \phi_0$ ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) の場合において位相整合条件 (7 式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$(s+1)\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L$$

にある。ただし、コア 301 内を伝搬する波動が伝搬角の最大値 ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) をもってコア 301 の側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0236】

このような「不完全閉じ込め多モード導波路」では、次のような作用効果が得

られる。

・伝搬角 ϕ が ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) 以下であれば閉じ込めがなされているが、導波路幅 $2L$ が大きいので複数のモードが伝播する可能性がある。

【0237】

・伝搬角 ϕ が ϕ_0 ($0 < \phi_0 < 90^\circ$) を超えると漏れ光が生じるので、急激な曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0238】

・単一モード伝播にはならないが、導波路幅が広いので外部平面波との結合が容易になる。単一モード伝播が特に必要ではない、たとえばダイテクタに光を導く導波路などに利用することができる。

【0239】

[第4実施形態]

図46は第4実施形態に係るフォトニック結晶導波路200Aを示している。

このフォトニック結晶導波路200Aは、一方向（周期方向であるY方向）にのみ周期性を有する1次元フォトニック結晶50により構成され、その一方向に垂直な方向（XZ平面方向）に電磁波（伝播光52）が伝播するコア201Aと、クラッド202Aとを備えている。

【0240】

コア201Aは、図21に示すフォトニック結晶導波路200のコア201と同じ構成である。クラッド202Aは、コア201Aの周期方向（一方向）に垂直な両側表面に形成された金属膜などの反射層であり、コア201内を伝播する電磁波が周期方向にその両側表面（上下の表面）から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドである。

【0241】

このような構成のフォトニック結晶導波路200Aについても、上記第1実施形態で説明した「完全閉じ込め多モード導波路」、および「不完全閉じ込め多モード導波路」や、上記第2実施形態で説明した「不完全閉じ込め多モード導波路」を実現することができる。ただし、金属膜などは反射率が低いので、あまり長

距離の導波路とするのは困難となる。

【0242】

[第5実施形態]

次に、第5実施形態に係るフォトニック結晶導波路200Bについて説明する。このフォトニック結晶導波路200Bは、図47および図48に示すように、図21に示すフォトニック結晶50と同様の1次元フォトニック結晶（周期的多層膜）により構成され、基板220上に直角に折り曲げられた導波路構造のコア230を備える。コア230の入射端面230aには、図15に示す位相格子70と同様の位相格子240が配置されている。

【0243】

このような構成のフォトニック結晶導波路200Bについて、入射端面230aに平面波を垂直入射させた場合について、以下の条件での電磁波シミュレーション（FDTD，時間領域有限差分法による）を実施した。コア230を構成するフォトニック結晶の多層膜積層方向（Y方向）の境界条件は周期境界とし、周期的多層膜構造の4周期分だけを取り出して計算を行った。

（1）周期的多層膜の構造

つぎの媒体AとBを交互に2周期重ねたものである。

【0244】

（媒体A） 厚さ $t_A = 0.30a$ 屈折率 $n_A = 2.1011$

（媒体B） 厚さ $t_B = 0.70a$ 屈折率 $n_B = 1.4578$

計算上、周期 $a = 430\text{ nm}$ に設定した。

（2）コア（導波路）230の構造

コア230は、入射端面230aからZ方向への長さが $2\mu\text{m}$ の直線導波路部231と、内側の側壁が直角に、外側の側壁が 45° 折り曲げられた二等辺三角形形状の直角曲げ部232と、X方向への長さが $30\mu\text{m}$ の直線導波路部233とからなる構造とした。XZ平面方向において、コア230の外側は屈折率1の均質媒体であり、コア230の直線導波路部231，233の横幅はそれぞれ $3\mu\text{m}$ である。

（3）入射光

(真空中の波長) $\lambda_0 = 1540 \text{ nm}$ ($a/\lambda_0 = 0.2792$)

(偏光) TE 偏光 (入射光の電場の向きが X 方向)

(4) 入射端面 230 a と位相格子 240 の構造

図 49 は、位相格子 240 とコア 230 の直線導波路部 231 の配置を示している。入射光は、屈折率 3.48 の自由空間 (媒体 C) から直線導波路部 231 に入射させ、境界部分では媒体 C に矩形の周期的な溝 241 を形成し、この溝 241 に媒体 D を充填して位相格子 240 が形成されている。位相格子 240 の形状は、±1 次回折光が強くなるように最適化したものである。位相格子 240 は、その凸部である媒体 C 層の中心がコア 230 (周期的多層膜) の高屈折率層 (Ta₂O₅) の中心と一致するようにコア 230 に接して配置されている。

【0245】

(媒体 C) 屈折率 $n_C = 3.48$

(媒体 D) 屈折率 $n_D = 1.50$

(位相格子 240 の Y 方向周期) $2a = 860 \text{ nm}$

シミュレーション結果として、コア 230 の高屈折率層の中心における電場の強度分布を図 50 に示す。伝播光はブリルアンゾーンの境界線上の第 1 バンドによるモードであり、伝播方向の波長 λ は 4400 nm である。

【0246】

本計算例の諸条件、

$$a = 430 \text{ nm}$$

$$\lambda_0 = 1540 \text{ nm}$$

$$\lambda = 4400 \text{ nm}$$

$$n_s = 1.00$$

$$n_{eff} = \lambda / \lambda_0 = 0.348$$

より、

$$f(\phi) = a(\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5} - (\lambda_0 / n_s)$$

は ϕ の値にかかわらず負となるので、完全閉じ込め条件を満足している。従って、シミュレーション結果においても直角曲げによる漏れ光はほとんど発生してい

ない。

【0247】

また、コア230の曲がり部分で波面の方向の傾きが発生しているが、その後の伝播で波面は伝播方向と垂直にもどってきている。このことから、このフォトリック結晶導波路200Bは単一モード条件を満たしているものと考えられる。単一モード条件の範囲は、

必要条件 : $0 \leq 2L \leq 4400 \text{ nm}$ ($4400 \text{ nm} = \lambda$)

十分条件 : $2L = 2200 \text{ nm}$ ($2200 \text{ nm} = \lambda/2$)

であり、空気層への電場の染み出しがほとんどないことから境界面反射での位相差 Φ は π に近い値である。従って、導波路幅 $2L = 3 \mu\text{m}$ は単一モード条件を満たし得る値である。

【0248】

以上のように構成された第5実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・フォトリック結晶導波路200Bは、単一モード伝播のまま急激曲げが可能であり、導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。また、 n_{eff} が0.348と小さく、分散や群速度異常の大きい領域となっているので、機能性導波路にも適している。

【0249】

[第6実施形態]

図51は第6実施形態に係るフォトリック結晶導波路200Cを示している。このフォトリック結晶導波路200Cは、図47のフォトリック結晶導波路200Bの導波路幅($3 \mu\text{m}$)を $5 \mu\text{m}$ にしたもので、その他の部分はフォトリック結晶導波路200Bと同じであるので、コア230'以外はこれと同じ符号を付してある。

【0250】

本実施形態のフォトリック結晶導波路200Cでも、完全閉じ込め条件はフォトリック結晶導波路200Bと同じなので、満足されている。しかし、導波路幅 $2L = 5 \mu\text{m}$ は、フォトリック結晶導波路200Bで示した単一モード伝播の必要条件

$$0 \leq 2L \leq 4400 \text{ nm} \quad (4400 \text{ nm} = \lambda)$$

を満たしていないので、多モードとなり得る。

【0251】

シミュレーション結果として、コア230'を構成する1次元フォトニック結晶（周期的多層膜）の高屈折率層の中心における電場の強度分布を図52に示す。直角曲げ後の電場パターンは図47のフォトニック結晶導波路200Bよりも複雑なものとなり、0次および1次モードが混ざり合っている。しかし、空気層への漏れ光はほとんど発生していない。

【0252】

以上のように構成された第6実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・多モード伝播であっても完全閉じ込め条件が満たされていれば漏れ光が発生しないことがわかる。従って、導波路の幅や形状を変えて共振器とすることも容易である。

【0253】

[第7実施形態]

図53は第7実施形態に係るフォトニック結晶導波路200Dを示している。フォトニック結晶導波路200Dでは、1次元フォトニック結晶で構成されたコア230Bの入射部分の導波路幅を、多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ状に導波路幅を狭くして単一モード導波路に変換する「テーパ導波路」としている。

【0254】

単一モード条件を満たすためには、コアの導波路幅2Lを狭くする必要がある。ところが、たとえば導波路幅2Lが1μm程度の場合、コア直径が10μm程度の単一モード光ファイバとの結合が困難となり、損失が大きくなる。

【0255】

単一モード条件を満たすコアの導波路幅2Lを、コアの入射面もしくは出射面の近くでテーパ状に拡大すると、外部との接続効率を改善することができる。コアのテーパ部分の形状を設計する場合には、テーパ部分での損失や高次モードの発生が十分に少なくなることを、電磁波シミュレーションなどによって確認して

おくことが望ましい。

(1) 周期的多層膜の構造

図 51 のフォトニック結晶導波路 200B と同じである。

(2) コア (導波路) 230 の構造

コア 230B の入射端面後における導波路構造は、直線導波路 231B と、ダウンテーパー型のテーパー導波路 232B と、直線導波路 233B とからなるダウンテーパー構造とした。直線導波路 231B の X 方向の幅は $5\mu\text{m}$ 、Z 方向の長さは $5\mu\text{m}$ である。テーパー導波路 232B の X 方向の幅は $5\mu\text{m}$ から $3\mu\text{m}$ に変化し、Z 方向の長さは $6\mu\text{m}$ である。直線導波路 233B の X 方向の幅は $3\mu\text{m}$ 、Z 方向の長さは $10\mu\text{m}$ である。

(3) 入射光

(真空中の波長) $\lambda_0 = 1540\text{nm}$ ($a/\lambda_0 = 0.2792$)

(偏光) TE 偏光 (電場の向きが X 方向方向)

(4) コア 200D の入射端面と位相格子 240 の構造

図 47 のフォトニック結晶導波路 200B と同じである。

【0256】

このような構成のフォトニック結晶導波路 200D についてのシミュレーション結果として、コア 230B の高屈折率層の中心における電場の強度分布を図 54 に示す。直線導波路 231B の導波路幅 $5\mu\text{m}$ の伝播光が、テーパー導波路 232B により波面の乱れなしに幅 $3\mu\text{m}$ の単一モード導波路である直線導波路 233B に結合していることわかる。テーパー導波路 232B 部分でのリークは少ない。

【0257】

以上のように構成された第 7 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

フォトニック結晶導波路 200D のコア 230B は、その入射部分である直線導波路 231B の導波路幅を、多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパー状導波路 232B により導波路幅を狭くして単一モード導波路 (直線導波路 233B) に変換する構成になっている。このようなフォトニック結晶導波路 200D を用いれば、たとえば単一モード光ファイバ (コア直径 $10\mu\text{m}$) と単一モー

導波路である直線導波路 233B (コア幅 $3\mu\text{m}$) の接続が容易になる。

【0258】

次に、上記各実施形態で説明したフォトニック結晶導波路や均質媒体導波路を用いた光学素子について説明する。

導波路型の光学素子は均質媒体導波路を用いて実現されており、また 2 次元フォトニック結晶欠陥導波路などを用いたものも盛んに提案、研究されている。本発明による導波路を用いれば、こういった光学素子のなかの多くを、以下に列挙した特徴を備えた導波路型光学素子として置きかえることができる。

【0259】

- ・急激曲げが可能であり、導波路や素子の配置が自由なので、小型化・集積化が容易になる。

- ・大きい分散や遅い群速度の伝播光が得られるので、素子の機能を高めることができる。あるいは、素子自体を小型化することができる。

【0260】

- ・単純な多層膜を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくてもよいので低コストで製作することができる。

- ・完全閉じ込めも可能なので、共振器などにも応用できる。

【0261】

[第 8 実施形態]

図 55 は、第 8 実施形態に係る光学素子としての方向性結合器 300A を示している。

【0262】

この方向性結合器 300A は、基板 301 と、基板 301 上に形成された 2 つの導波路 302, 303 とを備え、各導波路 302, 303 は、所定の結合長 L_1 にわたり結合領域 302a、303a で近接するように屈曲して形成されている。各導波路 302, 303 は、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図 2 に示すフォトニック結晶導波路 200 で構成されている。

【0263】

導波路 302 の両側端面であるポート P1, P3 には位相格子 311, 313

がそれぞれ設けられており、また、導波路 303 の両側端面であるポート P2, P4 にも位相格子 312, 314 がそれぞれ設けられている。これら 4 つの位相格子 311 ~ 314 は、図 10 に示す位相格子 64 或いは図 15 に示す位相格子 70 と同様の機能を有するものである。

【0264】

この方向性結合器 300A は、例えば、単一モード光ファイバ 321 により伝送される入射光（信号光）A がロッドレンズ 331 および位相格子 311 を介して導波路 302 に入射し、その結合領域 302a、303a によって導波路 302, 303 共に例えば 50% の光に分岐される。分岐された信号光は、導波路 302, 303 をそれぞれ通って、位相格子 313, 314 およびロッドレンズ 333, 334 を介して単一モード光ファイバ 323, 324 にそれぞれ接合するようになっている。

【0265】

単一モード光ファイバ 322 により伝送される入射光（信号光）B がロッドレンズ 332 および位相格子 312 を介して導波路 303 に入射する場合も、入射光 A の場合と同様である。

【0266】

以上のように構成された第 8 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・各導波路 302, 303 は上述したフォトニック結晶導波路 200 で構成されているので、各導波路 302, 303 の急激曲げが可能であり、基板 301 上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記特許文献 2 のような従来技術よりも、方向性結合器自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

【0267】

・特に、各導波路 302, 303 の 2 つの結合領域 302a、303a 前後の屈曲部において急激曲げが可能になるので、各導波路 302, 303 全体の長さを、上記特許文献 2 のような従来技術より大幅に短くすることができる。

【0268】

・上述した従来技術（2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路）では、平

面方向（XZ方向）の閉じ込めはPBGにより行なわれているが、上下方向（Y方向）の閉じ込めは、より困難であり、伝搬損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、導波路の上下共に空気層とする、いわゆる「エアブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。したがって、このような従来の欠陥導波路を用いて方向性結合器を作製すると、伝搬損失が大きく、コスト高になってしまう。

【0269】

これに対して、各導波路302, 303を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝搬損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

【0270】

・各導波路302, 303を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

【0271】

・フォトニック結晶導波路で構成された各導波路302, 303では、大きい分散や遅い群速度の伝播光が得られる。そのため、2つの導波路302, 303の結合領域302a、303aの結合長L1を従来の方向性結合器の導波路よりもはるかに短くすることができ、小型化を図ることができるとともに、方向性結合器の機能を高めることができる。

【0272】

・2つの導波路302, 303は図21に示すフォトニック結晶50のような単純な周期的多層膜構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくてもよいので、2つの導波路302, 303を含む方向性結合器300Aを低コストで製作することができる。

【0273】

[第9実施形態]

図56は、第9実施形態に係る光学素子としてのマッハツェンダー型光スイッ

チ 350 を示している。

【0274】

このマッハツェンダー型光スイッチ 350 は、基板 301 と、基板 301 上に形成された導波路とを備える。この導波路は、一つの直線状の導波路 351 と、この導波路 351 から分岐した 2 つの導波路 352, 353 と、これら 2 つの導波路 352, 353 が合流した一つの直線状の導波路 354 とからなる。これらの導波路 351 ~ 354 はそれぞれ、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図 22 に示すフォトニック結晶導波路 200 で構成されている。導波路 351, 354 の各端面には、図 10 に示す位相格子 64 或いは図 15 に示す位相格子 70 と同様の機能を有する位相格子 356, 357 がそれぞれ設けられている。

【0275】

このマッハツェンダー型光スイッチ 350 は、単一モード光ファイバ 361 により伝送される入射光（信号光）A がロッドレンズ 363 および位相格子 356 を介して導波路 351 に入射し、導波路 351 を通った後分岐される。分岐された信号光は、導波路 352, 353 をそれぞれ通ってから再び合流し、導波路 354 を通った後、位相格子 357 およびロッドレンズ 364 を介して光ファイバ 362 に結合されるようになっている。

【0276】

導波路 351 内の伝播光（信号光）が 2 つの導波路 352, 353 に分岐されてから、再び導波路 354 で合流する際に、導波路 352, 353 をそれぞれ通った光信号の光路長差による位相差が π の偶数倍であれば元の信号光のまま導波路 354 を通って出力される（オン状態）。一方、その位相差が奇数倍であれば、合流した伝播光は打ち消し合って、信号光は出力されない（オフ状態）。

【0277】

このようなオン、オフをさせるため、マッハツェンダー型光スイッチ 350 では、2 つの導波路 352, 353 の少なくとも片方に「電流注入」「光の照射」などの手段を加えて導波路の屈折率を変化させると、位相差が変化するのでオン／オフを切り替えることができる。

【0278】

以上のように構成された第9実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・マッハツェンダー型光スイッチ350の各導波路351～354は上述したフォトリック結晶導波路200で構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板301上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記特許文献3のような2次元フォトリック結晶を有する光スイッチと比べて、光スイッチ自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

【0279】

特許文献3のような光スイッチでは、平面方向（XZ方向）の閉じ込めはPBGにより行なわれているが、上下方向（Y方向）の閉じ込めはより困難であり、伝搬損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、上記「エアブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。したがって、このような従来の欠陥導波路を用いてマッハツェンダー型光スイッチを作製すると、伝搬損失が大きく、コスト高になってしまいます。

【0280】

これに対して、各導波路351～354を構成するフォトリック結晶導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝搬損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

【0281】

・各導波路351～354を構成するフォトリック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

【0282】

・各導波路351～354は上記フォトリック結晶50のような1次元フォトリック結晶を基本構造とし、フォトリック結晶の屈折率差が小さくてもよいので、各導波路351～354を含むマッハツェンダー型光スイッチ350を低コストで製作することができる。

【0283】**[第10実施形態]**

図57は、第10実施形態に係る光学素子としての対称マッハツェンダー型光スイッチ370を示している。

【0284】

この対称マッハツェンダー型光スイッチ370は、基板301と、基板301上に形成された導波路とを備える。この導波路は、一つの直線状の導波路371と、この導波路371から分岐した2つの導波路372, 373と、これら2つの導波路372, 373の合流部から分岐した2つの直線状の導波路374, 375と、制御光用の導波路376, 377とからなる。これらの導波路371～377はそれぞれ、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。

【0285】

導波路371, 376, 377の各端面には、上記位相格子64或いは位相格子70と同様の機能を有する位相格子391～393がそれぞれ設けられている。また、導波路374, 375の各端面にも、同様の位相格子394, 395がそれぞれ設けられている。導波路372, 373には、非線形光学活性を有する成分を含ませた非線形部378, 379がそれぞれ設けられている。

【0286】

この対称マッハツェンダー型光スイッチ370は、単一モード光ファイバ381により伝送される信号光がロッドレンズ401および位相格子391を介して導波路371に入射し、導波路371を通った後分岐される。分岐された信号光は、導波路372, 373をそれぞれ通ってから再び合流し、その合流部から分岐した2つの導波路374, 375の一方を通った後、対応する位相格子394, 395およびロッドレンズ404, 405を介して光ファイバ384, 385にそれぞれ結合されるようになっている。

【0287】

制御光a, bはそれぞれ、光ファイバ382, 383、ロッドレンズ402, 403、位相格子392, 393を介して導波路376, 377に入射させて、

非線形部 378, 379 の非線形光学活性を有する成分を励起可能になっている。制御光 a で非線形部 378, 379 の前記成分を励起してその屈折率を変化させたとき、例えば、導波路 372, 373 の合流部における信号光の位相が一致していれば信号光が導波路 375 を通って出力され、その位相が半波長ずれていれば、信号光が導波路 374 を通って出力される。こうして制御光 a により導波路 372 の非線形部 378 の屈折率を変化させてスイッチングを行える。同様に、制御光 b により導波路 373 の非線形部 379 の屈折率を変化させてスイッチングを行えるようになっている。

【0288】

スイッチング速度は非線形作用の緩和時間によって制限されるが、制御光 a と b にわずかの時間差を設けると緩和過程を途中でキャンセルできるので、非常に短時間のスイッチングを実現できる。

【0289】

以上のように構成された第 10 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・ 2 次元フォトニック結晶の欠陥導波路を用いた上記非特許文献 1 と同様の対称マッハツェンダー型光スイッチを、1 次元フォトニック結晶によるフォトニック結晶導波路を用いて低コストで実現することができる。

【0290】

- ・ 各導波路 371 ~ 377 は上述したフォトニック結晶導波路 200 で構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板 301 上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記非特許文献 1 よりも、光スイッチ自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

【0291】

- ・ 上記非特許文献 1 のように 2 次元フォトニック結晶の欠陥導波路を用いた光スイッチでは、平面方向 (XZ 方向) の閉じ込めは PBG により行なわれているが、上下方向 (Y 方向) の閉じ込めは、より困難であり、伝搬損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、いわゆる「エアブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があっ

た。これに対して、各導波路 302, 303 を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝搬損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

【0292】

・各導波路 371～377 を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

【0293】

・各導波路 371～377 は図 21 に示すフォトニック結晶 50 のような単純な周期的多層膜構造である 1 次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくてもよいので、各導波路 371～377 を含む対称マッハツェンダー型光スイッチ 370 を低コストで製作することができる。

【0294】

[第 11 実施形態]

導波路状の光回路素子として、光遅延線がある（例えば、上記非特許文献 2 参照）。光遅延線は導波路の光学長を長く取ることによって容易に実現できる素子であるが、均質媒体導波路の場合は曲げ半径をあまり小さくできないので広い面積を必要とする。図 58 に示すような 2 次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路 410 による従来の光遅延線の場合は、急峻曲げにより光遅延線をコンパクトにまとめることができるが、曲げ損失や反射光の発生しやすい急峻曲げの回数が多くなることは、素子として好ましくない。

【0295】

図 59 は、第 12 実施形態に係る光学素子としての光遅延線 420 を示している。この光遅延線 420 は、基板 301 上にそれぞれ形成された連続する一つの導波路を含み、この一つの導波路は、2 つの直線状の導波路 421, 422 と遅延部分 423 とからなる。遅延部分 423 は、導波路 421, 422 間で、円形状に延びている。導波路 421, 422 と遅延部分 423 を含む一つの導波路は、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図 22 に示すフォトニック結晶導波

路 200 で構成されている。導波路 421, 422 の各端面には、位相格子 425, 426 がそれぞれ設けられている。

【0296】

以上のように構成された第 11 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・導波路 421, 422 と遅延部分 423 を含む一つの導波路に、上述した 1 次元フォトリック結晶による閉じ込めの強いフォトリック結晶導波路を用いているので、図 59 に示すような自由な形状の導波路とすることができる。従って、急峻曲げにこだわらず、わずかな曲率半径を持たせることによって曲げ損失を改善可能となり、小型化と低損失化を同時に実現する光遅延線 420 を設計することができる。

【0297】

- ・光遅延線 420 を、1 次元フォトリック結晶によるフォトリック結晶導波路を用いて低コストで実現することができる。

- ・遅延部分 423 の急激曲げが可能であり、基板 301 上における光遅延線 420 の配置の自由度が増す。このため、光遅延線 420 自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

【0298】

- ・導波路 421, 422 と遅延部分 423 を含む一つの導波路を構成するフォトリック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

【0299】

- ・導波路 421, 422 と遅延部分 423 を含む一つの導波路は上記フォトリック結晶 50 のような単純な周期的多層膜構造である 1 次元フォトリック結晶を基本構造とし、フォトリック結晶の屈折率差が小さくてもよいので、光遅延線 420 を低コストで製作することができる。

【0300】

[第 12 実施形態]

図60は、第12実施形態に係る光学素子としての光遅延線430を示している。この光遅延線430は、基板301上にそれぞれ形成された連続する一つの導波路を含み、この一つの導波路は、2つの直線状の導波路431、432と遅延部分433とからなる。遅延部分433は、導波路431、432間で、半径が次第に小さくなるように複数の円形状に巻かれている。導波路431、432と遅延部分433を含む一つの導波路は、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。導波路421、422の各端面にも、位相格子425、426がそれぞれ設けられている。

【0301】

以上のように構成された第12実施形態によれば、上記第11実施形態で得られる作用効果に加えて以下の作用効果を奏する。

- ・長い経路の遅延部分433を基板301上に小さな面積で配置することができる。

【0302】

〔第13実施形態〕

従来、2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路の近傍に点欠陥を設置することにより、共振によって特定の周波数の伝播光を点欠陥に捕捉させて取り出す波長フィルタが知られている（上記特許文献4参照）。また、同様な点欠陥部分を線状導波路の近傍に設置し、導波路中を伝播する波動との共振により位相差を生じさせて、スイッチングに用いる技術も知られている（上記特許文献5参照）。

【0303】

図61は、第13実施形態に係る光学素子としての点欠陥共振器440を示している。この点欠陥共振器440は、基板301と、この基板上に設けられた線状導波路441と、この線状導波路441の近傍に設置した大きさの異なる3つの点欠陥442～444とを備える。点欠陥は、導波路部分と同じ構成の1次元フォトニック結晶をたとえば楕円形状としたものを用いることができる。線状導波路441は、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。線状導波路441の両側端面には、位

相格子 445, 446 がそれぞれ設けられている。

【0304】

以上のように構成された第13実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・上記フォトニック結晶導波路で構成した線状導波路 441 の近傍に点欠陥 442～444 を設置することにより、共振によって特定の周波数の伝播光を点欠陥 442～444 に捕捉させて取り出すことができる。光路を逆転させれば、点欠陥 442～444 に照射した波長の信号を導波路側に取りこむこともできる。したがって、フォトニック結晶導波路を用いて、波長選択フィルタや光スイッチを構成することができる。

【0305】

[第14実施形態]

図62は、第14実施形態に係る光学素子としての点欠陥共振器 450 を示している。この点欠陥共振器 450 は、基板 301 と、この基板上に設けられ、図22に示すようなフォトニック結晶導波路 200 で構成された線状導波路とを備える。この線状導波路は、一つの直線状の導波路 451 と、この導波路 451 から分岐した2つの導波路 452, 453 と、これら2つの導波路の合流部から分岐した2つの直線状の導波路 454, 455 とからなる。導波路 452 の近傍に点欠陥 456 を設置してある。導波路 451, 454, 455 の各端面には、位相格子 457, 458, 459 がそれぞれ設けられている。

【0306】

点欠陥 456 部分の誘電率を電氣的、あるいは光学的な手段により変えると、線状の導波路 452 との共振周波数が変化するため、導波路 452 の伝播光の位相が変わり、出射光のポート A, B (出力光 A, B) を切り換えることができるようになっている。

【0307】

以上のように構成された第14実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・上記フォトニック結晶導波路で構成した線状の導波路 452 の近傍に設置した点欠陥 456 部分の誘電率を電氣的、あるいは光学的な手段により変えることにより、線状の導波路 452 との共振周波数が変化して、導波路 452 の伝播光

の位相が変わり、出射光のポート A, B (出力光 A, B) を切り換えることができる。したがって、導波路中を伝播する波動との共振により位相差を生じさせて、スイッチングに用いることができる。

【0308】

・導波路 452 と点欠陥 456 の間隔や、点欠陥 456 の大きさと形状などを自由に選択することができるので、設計と製作が容易である。

これ対して、上記特許文献 4, 5 のような 2 次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路の場合は、上記の条件が 2 次元周期の整数倍に限られる、といった制約がある。そのため、多波長分離フィルターを構成するために 2 次元周期を段階的に変化させる、といった工夫が必要となっている。

【0309】

[第 15 実施形態]

次に、第 15 実施形態に係る光学素子としての分散制御素子を、図 63～図 67 に基づいて説明する。

【0310】

光通信システムにおいて、光ファイバや光学素子に分散が生じるとパルスが広がるので信号が劣化してしまう。特に 40 Gbps といった高速通信や DWDM (波長分割多重) 通信はパルスの広がりの影響がでやすいので、システム全体の分散を小さくすることが非常に重要である。

【0311】

システム全体の分散を小さくするためには、ある素子で分散の生じた信号を、それと逆の分散を生じる「分散制御素子」に通す方法が有効である。長距離のファイバーによる波長分散を補償する素子としては、分散補償ファイバがある。また、利得スイッチ半導体レーザなどによって作られたレッドシフト・チャープニングの大きいパルスを、負の波長分散を有する光ファイバに通すことによって、パルス幅を圧縮できることも良く知られている。

【0312】

本実施形態では、上記フォトニック結晶導波路を用い、分散の大きい条件の伝播光を用いれば、そのまま分散を制御する素子として用いることができる。以下

の媒体 A, B

A: 屈折率 $n_A = 2.10$ (厚さ $t_A = 0.5a$)

B: 屈折率 $n_B = 1.45$ (厚さ $t_B = 0.5a$)

を交互に重ね合わせた周期 a の 1 次元フォトニック結晶について、

(イ) ブリルアンゾーンの中心線上の、第 1 バンド

(ロ) ブリルアンゾーンの境界線上の、第 1 バンド

(ハ) ブリルアンゾーンの中心線上の、第 2 バンド

(ニ) ブリルアンゾーンの境界線上の、第 2 バンド

により Z 方向方向に進行する伝播光について考える。上記の各伝播光のバンド図上での位置は図 6 3 に示す。各伝播光 (イ) ~ (ニ) について入射光の波長 (横軸) と分散 (縦軸) の関係をバンド計算から求めたものを、図 6 4 ~ 図 6 7 の各グラフに示してある。図 6 4 ~ 図 6 7 の各グラフにおいて、横軸の単位は a 、縦軸の単位は $1/c a$ (c は光速) であり、たとえば $a = 1000 \text{ nm}$ の場合、横軸の 1 は 1000 nm に相当し、縦軸の 1 はおよそ 3.3 ps/nm/m (長さ 1 m の導波路について、波長差 1 nm あたり 3.3 ps の分散) に相当する。本計算では材料分散が考慮されていないが、分散の絶対値や変化が石英などの材料分散よりもはるかに大きいので、差し支えない。

【0313】

以上のように構成された第 15 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・分散の大きい条件の伝播光を用いることにより、光通信システムにおいて分散の生じた信号に逆の分散を与えることができ、長距離の光ファイバによる波長分散を補償することができる。

【0314】

・図 6 6 のグラフに示す上記伝播光 (ニ) の場合を例にとると、入射光の波長が長くなるに従って分散が次の 4 つの領域で変化することがわかる。

・分散が正で、グラフは右下がり、ゼロ分散に至る (領域 461)。

【0315】

・分散が負で、グラフは右下がり、極小値に至る (領域 462)。

・分散が負で、グラフは右上がり、ゼロ分散に至る (領域 463)。

- ・分散が正で、グラフは右上がり、傾きは急激に大きくなる（領域 464）。

【0316】

上述した 1 次元フォトニック結晶の周期 a は任意に選ぶことができるので、制御対象となる波長域に合わせて、どの領域でも分散制御に用いることができる。

たとえば、領域 462 の分散は通常の単一モード光ファイバー（SMF）の逆になっているので、SMF の分散補償に用いることができる。また、領域 464 では正の分散が非常に大きくなるので、短い導波路でもパルス圧縮を行なうことができる。ただし、この場合圧縮できるのはブルーシフト・チャープニングのかかったパルスである。

【0317】

・図 66 に示す伝播光（ハ）の場合でも、分散は図 67 に示す伝播光（ニ）の場合と同様な変化を示すので、分散制御に有用である。

・図 64 に示す伝播光（イ）や図 65 に示す伝播光（ロ）ももちろん分散制御に用いることができるが、伝播光（ハ），（ニ）のほうが利用しやすい。

【0318】

[第 16 実施形態]

次に、第 16 実施形態に係る光学素子としての光増幅素子 500 を、図 68 に基づいて説明する。

【0319】

光増幅素子 500 は、図 21 に示すフォトニック結晶導波路 200 と同様のコア 511 とクラッド 512 を有するフォトニック結晶導波路 510 を用いて構成されている。ただし、本例のフォトニック結晶導波路 510 は、そのコア 511 にエルビウム、ビスマスなどの発光物質を含ませており、この点でフォトニック結晶導波路 200 とは異なる。フォトニック結晶導波路 510 は基板 301 上に形成されており、コア 511 の一端面 511a，他端面 511b には位相格子 513，514 がそれぞれ設けられている。これらの位相格子 513，514 は、図 10 に示す位相格子 64 或いは図 15 に示す位相格子 70 と同様の機能を有するものである。

【0320】

コア 511 にエルビウム、ビスマスなどの発光物質を含ませるには、

- ・ 周期的多層膜構造のコア 511 の材料に発光物質を含ませる、
- ・ 発光物質そのものをコア 511 の材料として用いる、

などの方法が考えられる。

【0321】

以上のように構成された第 16 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・ 光増幅素子 500 のフォトニック結晶導波路 510 にポンプ光 516 を照射して、このポンプ光 516 でコア 201 に含ませてあるエルビウム、ビスマスなどの発光物質を励起することにより、入射した信号光 517 が増幅された信号光 518 を取り出すことができる。

【0322】

- ・ フォトニック結晶導波路 510 を上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になる。

【0323】

[第 17 実施形態]

次に、第 17 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子 600 を、図 69 に基づいて説明する。なお、以下の説明で、図 68 と同様の部材には同一の符号を付して重複した説明を省略する。

【0324】

この電極付導波路素子 600 は、図 68 のフォトニック結晶導波路 510 と同様のフォトニック結晶導波路 610 を用いて構成されている。ただし、本例のフォトニック結晶導波路 610 は、そのコア 611 には非線形特性を有する物質（以下、「非線形物質」という。）を含ませてあり、この点でフォトニック結晶導波路 510 と異なる。

【0325】

また、この電極付導波路素子 600 では、フォトニック結晶導波路 610 の下のクラッド 512 の全体を挟むように電極 520、521 が設けられている。これらの電極 520、521 は、例えば酸化インジウム錫 (Indium Tin Oxide)

膜などで構成された透明電極である。両電極 520, 521 は、導線 522 を介して電源 523 に接続されている。両電極 520, 521 に印加する電圧或いは電流を制御することにより、フォトニック結晶導波路 610（非線形物質）の非線形作用を制御するように構成されている。

【0326】

コア 511 に非線形物質を含ませるには、

- ・周期的多層膜構造のコア 611 の材料に非線形物質を含ませる、
- ・非線形物質そのものをコア 611 の材料として用いる、

などの方法が考えられる。

【0327】

以上のように構成された第 17 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・電極 520, 521 に印加する電圧や電流を制御することにより、フォトニック結晶導波路 610 のコア 611 に含ませてある非線形物質の非線形作用を制御することができる。これにより、群速度異常による非線形効果を可変にできるとともに、非線形効果の大きい非線形素子を実現することができる。

【0328】

・なお、本実施形態の応用例として、図 59 に示す光遅延線 420 の遅延部分 423 や図 60 に示す光遅延線 430 の遅延部分 433 を構成するフォトニック結晶導波路に、図 69 と同様に電極を取りつけるようにしてもよい。この構成とすることによって、光遅延線 420 の遅延部分 423 や光遅延線 430 の遅延部分 433 による遅延量を前記両電極に印加する電場（電圧）や電流により制御することができる。このように遅延量を制御可能な光遅延線を用いることにより、光スイッチなどを作ることが可能になる。

【0329】

[第 18 実施形態]

次に、第 18 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子 600A を、図 70 に基づいて説明する。

【0330】

この電極付導波路素子 600A は、図 69 に示す上記第 17 実施形態の電極付

導波路素子 600 と同様の構成を有し、レーザ光の波長変換を可能にしたものである。

【0331】

図 70 に示す電極付導波路素子 600 A を高温状態に置き、直流電圧を印加した状態で常温に戻す処理を行う。このような処理はポーリングと呼ばれており、フォトリック結晶導波路 610 のコア 611 に含ませた非線形物質の特性を大きくする効果がある。

【0332】

以上のように構成された第 18 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・ポーリングした電極付導波路素子 600 A のフォトリック結晶導波路 610 に、レーザ光である入射光 617 をフォトリック結晶導波路 610 に入射させると、たとえば強い第 2 高調波 (SHG), 第 3 高調波 (THG) の出射光 618 を発生させることができる。したがって、レーザ光の波長変換をすることができる。

【0333】

[第 19 実施形態]

次に、第 19 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子 500 A を、図 71 に基づいて説明する。この電極付導波路素子 500 A は、図 68 に示す上記第 16 実施形態の光増幅素子 500 のフォトリック結晶導波路 510 と同様に、そのコア 511 にエルビウム、ビスマスなどの発光物質を含ませたフォトリック結晶導波路 510 A を用いている。このフォトリック結晶導波路 510 A には、図 69 に示す上記第 17 実施形態と同様に透明電極である電極 520, 521 が設けられており、これらの電極 520, 521 は導線 522 を介して電源 523 と接続されている。

【0334】

以上のように構成された第 19 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・フォトリック結晶導波路 510 A に入射光 617 を入射させた状態で、両電極 520, 521 に電圧を印加し或いは電流を流すことにより、入射光 617 が発光物質によって増幅された光を、電極 520 を介して上方へ出射させることが

できる。したがって、電極付導波路素子 500A を発光素子として構成することができる。

【0335】

[第20実施形態]

次に、第20実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子 600B を、図72に基づいて説明する。この電極付導波路素子 600B は、図70に示す上記第18実施形態と同様のフォトニック結晶導波路 610 を用い、この導波路を挟むように同実施形態と同様に設けた電極 520, 521 に印加する電圧や電流を変化させるための変調器 620 を備えた変調素子である。

【0336】

以上のように構成された第20実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・フォトニック結晶導波路 610 の電極 520, 521 に印加する電圧や電流を変調器 620 により変化させることにより、入射光 617 に位相、振幅、偏波面、周波数などの変調を加えた変調された信号光 630 を出射させることができる。

【0337】

以下、上記各実施形態から把握できる技術思想について説明する。

(1) 請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、一つの直線状の導波路(371)と、該導波路(371)から分岐した2つの導波路(372, 373)と、これら2つの導波路の合流部から分岐した2つの直線状の導波路(374, 375)と、制御光用の導波路(376, 377)とを有する対称マッハツェンダー型光スイッチ(370)として構成され、前記各導波路〔371～377〕は前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成され、前記2つの導波路(372, 373)には非線形光学活性を有する成分を含ませた非線形部(378, 379)がそれぞれ設けられていることを特徴とする。

【0338】

この構成によれば、次の作用効果を奏する。

・2次元フォトニック結晶の欠陥導波路を用いた上記非特許文献1と同様の対

称マッハツェンダー型光スイッチを、1次元フォトリック結晶によるフォトリック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いて低コストで実現することができる。各導波路(371~377)はフォトリック結晶導波路或いは均質媒体導波路で構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記非特許文献1よりも、光スイッチ自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

【0339】

・上記非特許文献1のように2次元フォトリック結晶の欠陥導波路を用いた光スイッチでは、平面方向(XZ方向)の閉じ込めはPBGにより行なわれているが、上下方向(Y方向)の閉じ込めは、より困難であり、伝搬損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、いわゆる「エアーブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。これに対して、各導波路を構成するフォトリック結晶導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝搬損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

【0340】

・各導波路を構成するフォトリック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になる。これに対して、上述した従来の2次元フォトリック結晶の欠陥導波路の場合、XZ方向のPBGを完全なものとするためには、フォトリック結晶の屈折率差を大きくする必要があるが、高屈折率物質(たとえば $n=3.48$ のSi)と空気の組み合わせなどが選ばれる。導波路のコアをなす欠陥部分の屈折率が非常に大きくなるため、シングルモード条件を満たすために導波路コアの断面が非常に小さくなる(典型的には $1 \times 1 \mu\text{m}$ 以下)。上記特許文献1の方法では導波路断面を $2 \times 2 \mu\text{m}$ 程度まで大きくしているが、外部のシングルモードファイバ(コア $\phi 10 \mu\text{m}$ 程度)との差が大きく、効率良く結合させることが難しい。

【0341】

・各導波路をフォトニック結晶導波路とする場合、単純な周期的多層膜構造である 1 次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくてもよいので、各導波路を含む対称マッハツェンダー型光スイッチを低コストで製作することができる。

【0342】

(2) 請求項 1～32 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、線状導波路 (441) と、該線状導波路の近傍に設けた少なくとも一つの点欠陥 (442～444) とを備えた点欠陥共振器 (波長フィルタ) として構成され、前記線状導波路を前記フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路のいずれかで構成したことを特徴とする。

【0343】

この構成によれば、次の作用効果を奏する。

・前記フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路で構成した線状導波路の近傍に点欠陥を設けることにより、共振によって特定の周波数の伝播光を点欠陥に捕捉させて取り出すことができる。光路を逆転させれば、点欠陥に照射した波長の信号を導波路側に取りこむこともできる。したがって、フォトニック結晶導波路を用いて、波長選択フィルタや光スイッチを構成することができる。

【0344】

(3) 請求項 1～32 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、一つの直線状の導波路 (451) と、該導波路から分岐した 2 つの導波路 (452, 453) と、これら 2 つの導波路の合流部から分岐した 2 つの直線状の導波路 (454, 455) と、前記 2 つの導波路 (452, 453) の少なくとも一方の近傍に設けた少なくとも一つの点欠陥とを有する点欠陥共振器として構成され、前記各導波路 (451～455) が前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路で構成されていることを要旨とする。

【0345】

この構成によれば、次の作用効果を奏する。

・上記フォトニック結晶導波路で構成した 2 つの導波路 (452, 453) の

少なくとも一方の近傍に設置した点欠陥部分の誘電率を電氣的、あるいは光学的な手段により変えることにより、その導波路との共振周波数が変化して、その導波路の伝播光の位相が変わり、出射光の出力位置（ポート）を切り換えることができる。したがって、導波路中を伝播する波動との共振により位相差を生じさせて、スイッチングに用いることができる。

【0346】

・導波路と点欠陥の間隔や、点欠陥の大きさと形状などを自由に選択することができるので、設計と製作が容易である。これに対して、上記特許文献4、5のような2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路の場合は、上記の条件が2次元周期の整数倍に限られる、といった制約がある。そのため、多波長分離フィルターを構成するために2次元周期を段階的に変化させる、といった工夫が必要となっている。

【0347】

(4) 請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路(510)を備え、前記導波路のコア(511)に発光物質を含ませてあり、前記発光物質をポンプ光(516)で励起する光増幅素子として構成したことを特徴とする。

【0348】

この構成によれば、次の作用効果を奏する。

・フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路のいずれかで構成され、コアに発光物質を含ませてある導波路にポンプ光を照射して、発光物質を励起することにより、入射した信号光が増幅された信号光を取り出すことができる。発光物質は、例えばエルビウム、ビスマスなどである。

【0349】

・導波路を上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になる。

(5) 請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは

前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路(610)を備え、前記導波路のコア(611)に非線形特性を有する物質を含ませてあり、前記導波路の前記一方向における両側表面に2つの電極を設けた電極付導波路素子(600A)として構成し、前記電極付導波路素子を高温状態に置き、前記2つの電極直流電圧を印加した状態で常温に戻す処理を行うことを特徴とする。

【0350】

この構成によれば、前記処理(ポーリング)により、フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路のコアに含ませた非線形物質の特性を大きくする効果がある。ポーリングした電極付導波路素子の導波路に、レーザー光などの入射光を入射させると、たとえば強い第2高調波(SHG)、第3高調波(THG)の出射光を発生させることができる。したがって、レーザー光の波長変換をすることができる。

【0351】

(6) 請求項1~32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路(610)を備え、前記導波路のコア(510A)に発光物質を含ませてあり、前記導波路の前記一方向における両側表面に、少なくとも一方が透明電極である2つの電極を設けた電極付導波路素子(500A)として構成したことを特徴とする。

【0352】

この構成によれば、フォトニック結晶導波路に入射光を入射させた状態で、両電極に電圧を印加し或いは電流を流すことにより、入射光が発光物質によって増幅された光を、2つの電極のうちの透明電極を介して上方へ出射させることができる。したがって、電極付導波路素子を発光素子として構成することができる。

【0353】

なお、この発明は以下のように変更して具体化することもできる。

・上記フォトニック結晶導波路に用いるフォトニック結晶の材料としては、使用波長域における透明性が確保できるものであれば特に限定はないが、一般的に多層膜の材料として用いられていて耐久性や製膜コストの点で優れたシリカ、シ

リコン、酸化チタン、酸化タンタル、酸化ニオブ、フッ化マグネシウム、窒化シリコンなどが適する材料である。上記材料は、スパッタリング、真空蒸着、イオシアシスト蒸着、プラズマCVDなどの良く知られた方法により、容易に多層膜とすることができる。

【0354】

・フォトニック結晶を構成する複数の材料間の屈折率比は大きくなるほど、波長分散なども大きくなる傾向があるので、そのような特性が必要な用途に対しては高屈折率材料と低屈折率材料を組合せることが望ましい。実用的に実現できる屈折率比は、たとえば低屈折率材料として空気（屈折率1）、高屈折率材料としてInSb（屈折率 $n=4.21$ ）を用いると4以上にすることができる（「微小光学ハンドブック」224頁、朝倉書店 1995年、参照）。

【0355】

・フォトニック結晶を構成する材料の屈折率比が小さくなると、偏光方向による特性の違いが小さくなる傾向があるので、偏波無依存を実現するためには屈折率比の小さい組合せも有用である。材料を適切に選定すれば、本発明の作用は通常使用される200nm～20μm程度の波長範囲で発揮される。

【0356】

・上記実施形態では、基板上に周期的多層膜構造のフォトニック結晶を用いたフォトニック結晶導波路やこれを用いた光学素子について説明したが、基板を用いず、周期的多層膜層だけから構成される、いわゆるエアープリッジ構造としてもよい。

【0357】

・図40に示す第3実施形態の均質媒体導波路300では、均質物質で構成されたコア301のY方向に垂直な両側表面には、閉じ込め用クラッドとしてY方向に周期性を有する1次元フォトニック結晶で構成したクラッド312を設けてあるが、本発明はこれに限定されない。その閉じ込め用クラッドを、クラッド312に代えて、図46に示すクラッド202Aと同様に金属膜などの反射層としてもよい。

【0358】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、急激曲げや自由な角度での配置が可能なフォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、および、これらの導波路を用いた各種の光学素子を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 フォトニック結晶内における光の伝播を示す模式図。

【図 2】 フォトニック結晶のフォトニックバンド構造の一例を示す図。

【図 3】 フォトニック結晶の端面に垂直入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図 4】 フォトニック結晶の端面に垂直入射した入射光とフォトニック結晶との結合をブリルアンゾーンの Z 方向のみに限定して示した図。

【図 5】 フォトニック結晶の端面に斜め入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図 6】 ブリルアンゾーンの境界線上での伝播が起こるように斜め入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図 7】 ブリルアンゾーンの境界線上での伝播が起こるように斜め入射した入射光とフォトニック結晶との結合をブリルアンゾーンの Z 方向のみに限定して示した図。

【図 8】 交差する 2 方向の平面波による位相変調入射光を示す図。

【図 9】 交差する 3 方向の平面波による位相変調入射光を示す図。

【図 10】 フォトニック結晶の入射側および出射側に設置した周期 a の位相格子による位相変調を示す模式図。

【図 11】 ブリルアンゾーンの境界線上での、第 1 および第 2 バンドによる伝播光を模式的に示した図。

【図 12】 ブリルアンゾーンの境界線上での、第 1 および第 2 バンドによる伝播光の合成による電場パターンを模式的に示した図。

【図 13】 フォトニック結晶の端面に斜め入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図 14】 交差する 2 方向の平面波の干渉による入射光の位相変調を示す

図。

【図 15】 フォトニック結晶の入射側および出射側に設置した周期 $2a$ の位相格子による位相変調を示す模式図。

【図 16】 周期 $2a$ の位相格子と斜め入射による干渉波を利用する場合の計算例における位相格子の回折光を示す図。

【図 17】 周期 $2a$ の位相格子と斜め入射による干渉波を利用する場合の計算例における電場パターンを示す図。

【図 18】 周期 $2a$ の位相格子と斜め入射による干渉波を利用する場合で、位相格子を特定の条件で設置した場合の計算例における電場パターンを示す図。

【図 19】 (a) ブリルアンゾーンの境界線上での伝播光を得るのに、斜め端面への平面波の入射を説明する図、(b) 斜め端面に入射角 θ_0 で入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図 20】 第 1 実施形態に係るフォトニック結晶導波路を用いた光学素子を示す斜視図。

【図 21】 第 1 実施形態に係るフォトニック結晶導波路内における光の伝搬を示す模式図。

【図 22】 図 21 のフォトニック結晶導波路のコアを示す斜視図。

【図 23】 ブリルアンゾーン内の第 1 バンド上の点による伝播光の波数ベクトルを示す図。

【図 24】 フォトニック結晶のコア厚さ $2A$ の説明図。

【図 25】 位相整合条件を満たす伝播光、すなわちモードの説明図。

【図 26】 第 2 バンドによるモードを示す説明図。

【図 27】 周期 a のコアに周期 b ($a < b$) のクラッドをつけた場合のバンド図。

【図 28】 Y 方向 m 次モードのバンドを逆空間の XZ 方向に示した説明図。

【図 29】 ブリルアンゾーン境界伝播での垂直入射の場合におけるフォトニック結晶導波路の側面に露出する電場パターンを示す図。

【図 3 0】 ブリルアンゾーン境界伝播での斜め入射の場合におけるフォトリック結晶導波路の側面に露出する電場パターンを示す図。

【図 3 1】 ブリルアンゾーン境界伝播での伝搬光が X Z 平面内で Z 方向に対して伝搬角 ϕ 傾いて進行する場合における位相整合条件の説明図。

【図 3 2】 ブリルアンゾーン境界伝播での伝搬角 ϕ に対して単一モード条件を満たす $2L$ の範囲を模式的に示すグラフ。

【図 3 3】 ブリルアンゾーン境界伝播での閉じ込め条件と単一モード条件を満たす $2L$ の範囲を模式的に示すグラフ。

【図 3 4】 図 3 3 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 3 5】 図 3 3 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 3 6】 クラッドの P B G による閉じ込めの説明図。

【図 3 7】 第 2 実施形態のブリルアンゾーン中央伝播での斜め入射の場合におけるフォトリック結晶導波路の側面に露出する電場パターンを示す図。

【図 3 8】 ブリルアンゾーン中央伝播での閉じ込め条件と伝搬角 ϕ に対して単一モード条件を満たす $2L$ の範囲を模式的に示すグラフ。

【図 3 9】 図 3 8 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 4 0】 第 3 実施形態に係る導波路内における光の伝播を示す模式図。

【図 4 1】 図 4 0 に示すコアのバンド図におけるモードを示す説明図。

【図 4 2】 図 4 0 に示すコア内を高次モード伝搬光が X Z 平面内で伝搬角 ϕ 傾いて進行する場合にコア側面に露出する電場パターンを示す説明図。

【図 4 3】 図 4 0 に示すコアの閉じ込め条件と、伝搬角 ϕ に対して単一モード条件を満たす $2L$ の範囲を模式的に示すグラフ。

【図 4 4】 図 4 3 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 4 5】 図 4 3 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 4 6】 第 4 実施形態に係るフォトリック結晶導波路における光の伝播を示す模式図。

【図 4 7】 第 5 実施形態に係るフォトリック結晶導波路を示す平面図。

【図 4 8】 図 4 7 のフォトリック結晶導波路を示す斜視図。

【図 4 9】 図 4 7 のフォトリック結晶導波路の入射側を示す平面図。

【図 5 0】 図 4 7 のフォトニック結晶導波路のシミュレーション結果を示す説明図。

【図 5 1】 第 6 実施形態に係るフォトニック結晶導波路を示す平面図。

【図 5 2】 図 5 1 のフォトニック結晶導波路のシミュレーション結果を示す説明図。

【図 5 3】 第 7 実施形態に係るフォトニック結晶導波路を示す平面図。

【図 5 4】 図 5 3 のフォトニック結晶導波路のシミュレーション結果を示す説明図。

【図 5 5】 第 8 実施形態に係る光学素子としての方向性結合器を示す斜視図。

【図 5 6】 第 9 実施形態に係る光学素子としての光スイッチを示す平面図。

【図 5 7】 第 10 実施形態に係る光学素子としての対称マッハツェンダー型全光スイッチを示す平面図。

【図 5 8】 2 次元フォトニック結晶欠陥導波路による光遅延線の従来例を示す平面図。

【図 5 9】 第 11 実施形態に係る光学素子としての光遅延線を示す平面図。

【図 6 0】 第 12 実施形態に係る光学素子としての光遅延線を示す平面図。

【図 6 1】 第 13 実施形態に係る光学素子としての点欠陥共振器を示す平面図。

【図 6 2】 第 14 実施形態に係る光学素子としての点欠陥共振器を示す平面図。

【図 6 3】 第 15 実施形態に係る光学素子としての分散制御素子の説明に用いるバンド図。

【図 6 4】 図 6 3 の伝播光 (イ) について計算で求めた入射光の波長と分散の関係を示すグラフ。

【図 6 5】 図 6 3 の伝播光 (ロ) について計算で求めた入射光の波長と分

散の関係を示すグラフ。

【図 6 6】 図 6 3 の伝播光 (ハ) について計算で求めた入射光の波長と分散の関係を示すグラフ。

【図 6 7】 図 6 3 の伝播光 (ニ) について計算で求めた入射光の波長と分散の関係を示すグラフ。

【図 6 8】 第 16 実施形態に係る光学素子としての光増幅素子を示す斜視図。

【図 6 9】 第 17 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子を示す斜視図。

【図 7 0】 第 18 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子を示す斜視図。

【図 7 1】 第 19 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子を示す斜視図。

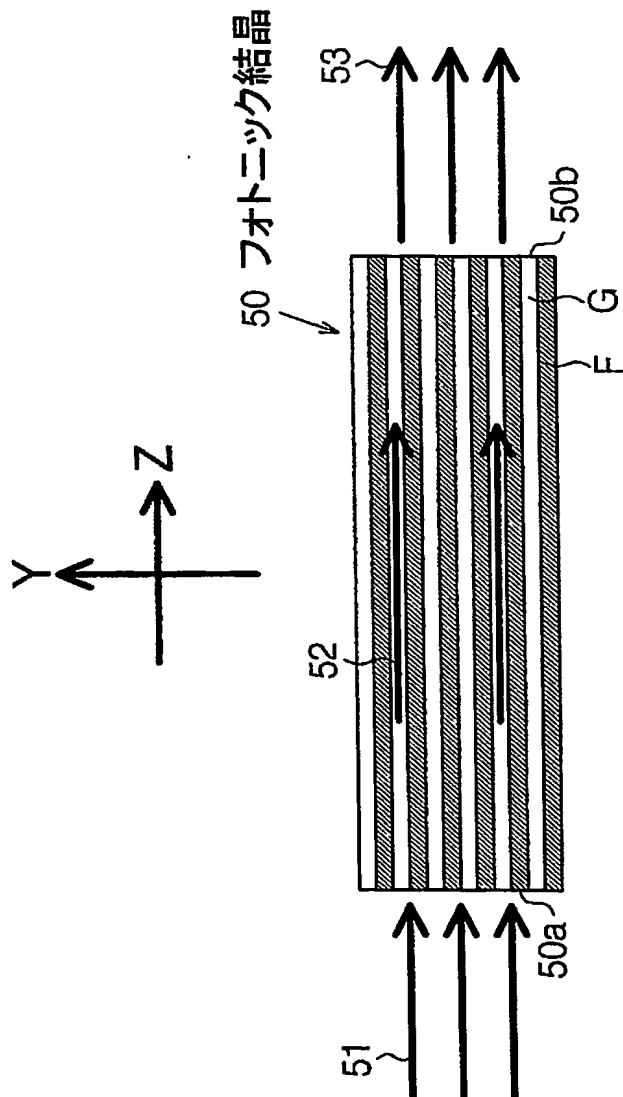
【図 7 2】 第 20 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子を示す斜視図。

【符号の説明】

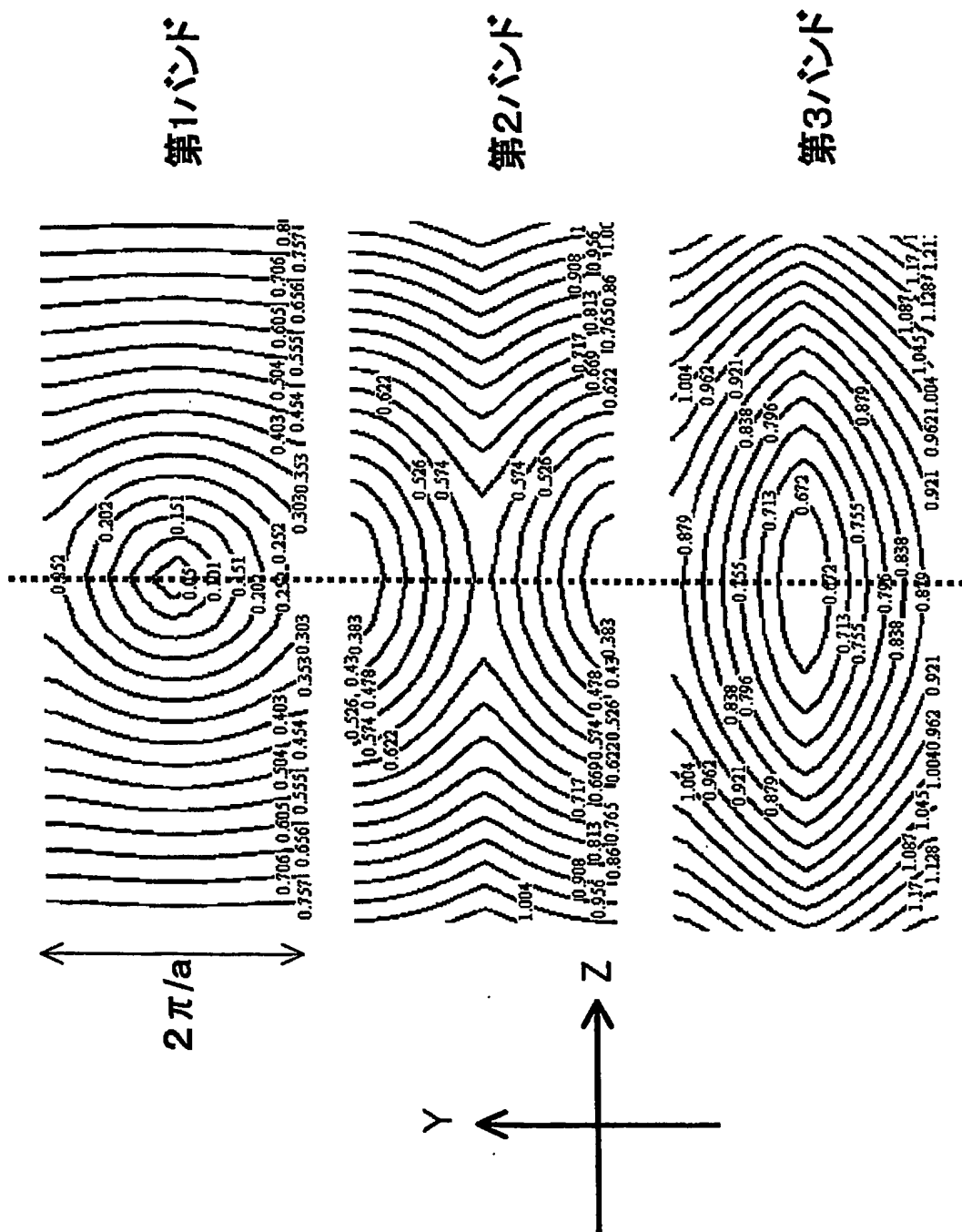
θ …入射角、 ϕ …伝搬角、 Φ …位相変化量、 λ …波長、A, B, M, N…物質、A, B, 51, 80, 94, 617…入射光、a, b, 2a…周期、n, n_0 , n_s …屈折率、tA, tB, 2B…厚さ、50…フォトニック結晶、50c, 112…端面、52, 521, 522…伝播光、53, 68, 97, 618…出射光、60, 61…ブリルアンゾーンの中心線、62a, 62b, 62c, 69…平面波、64, 67, 70, 71, 92, 93, 110, 240, 311, 311~314, 356, 357, 391~395, 425, 426, 445~459, 513, 514…位相格子、66a, 66b…回折光、100a, 100b…ブリルアンゾーンの境界線、200, 200A, 200B, 200C, 200D, 510, 510A, 610…フォトニック結晶導波路、201, 201A, 230, 230B, 301, 511, 611…コア、300…均質媒体導波路、300A…方向性結合器、500A, 600, 600A, 600B…電極付導波路素子、520, 521…電極、620…変調器。

【書類名】 図面

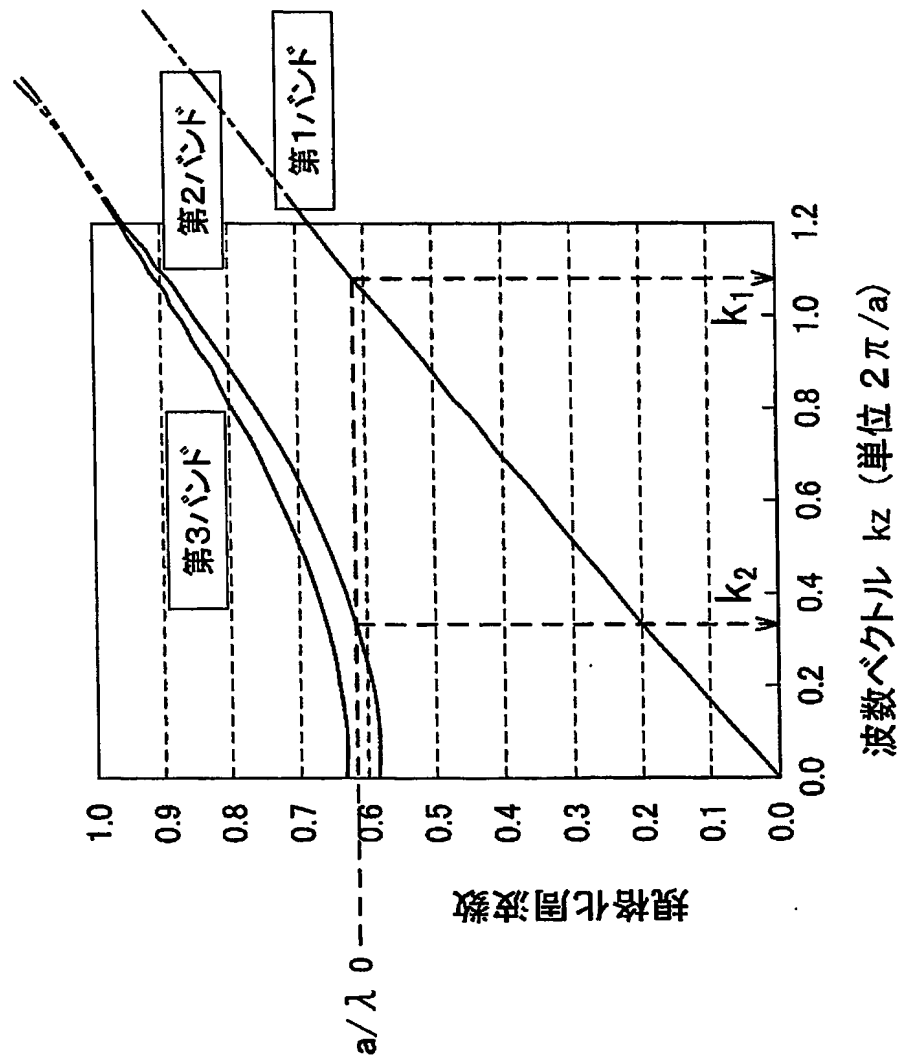
【図 1】



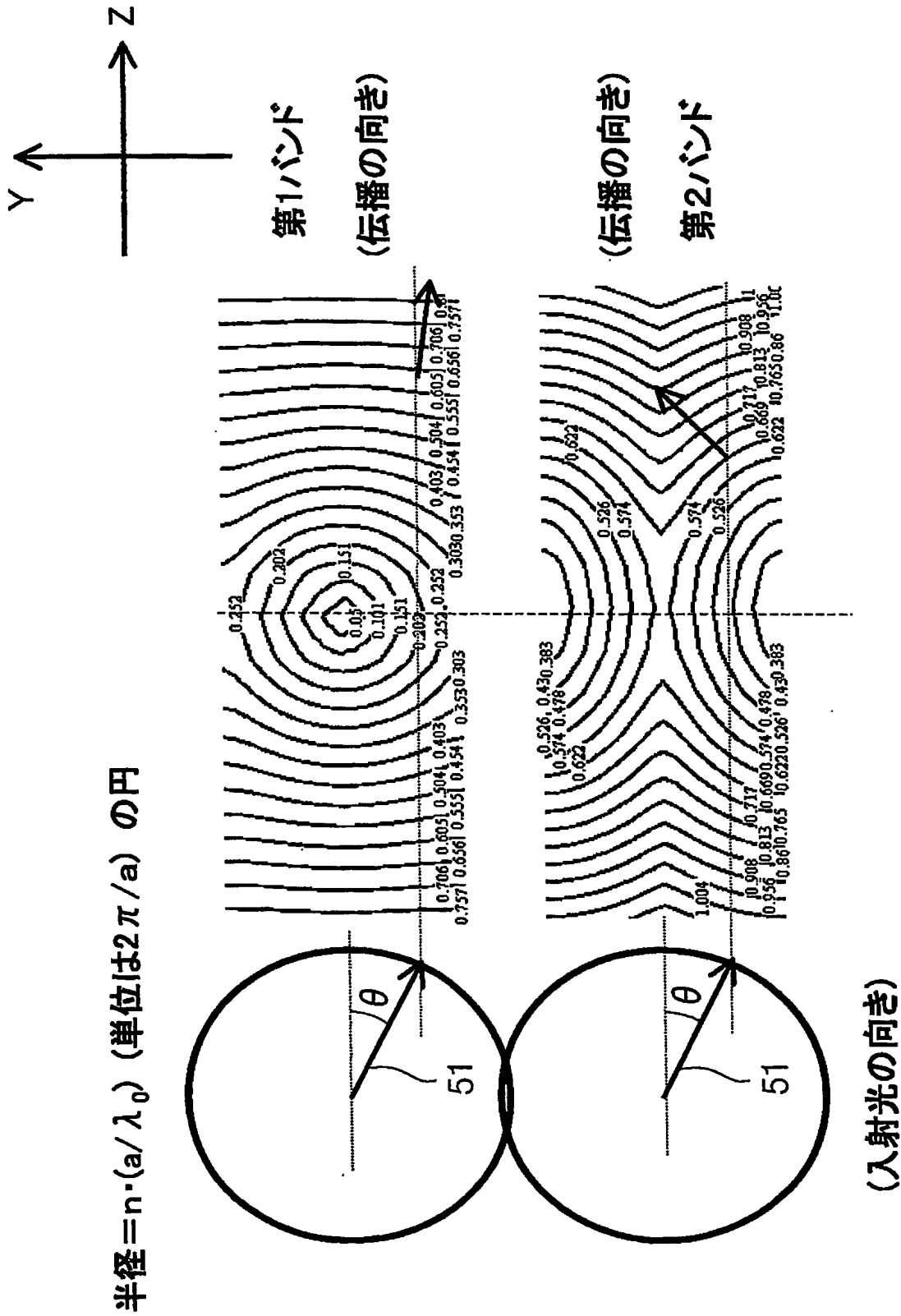
【図 2】



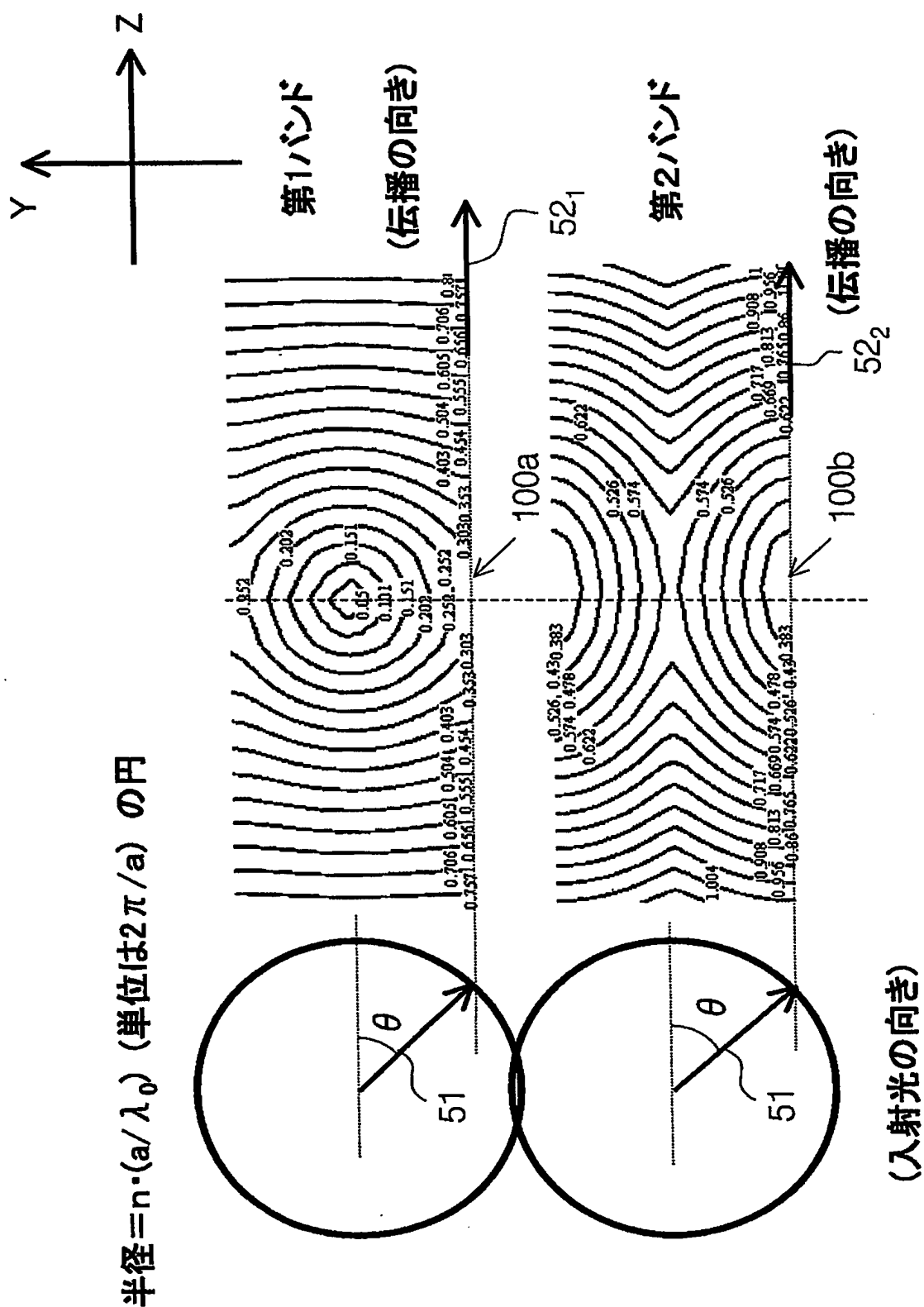
【図 4】



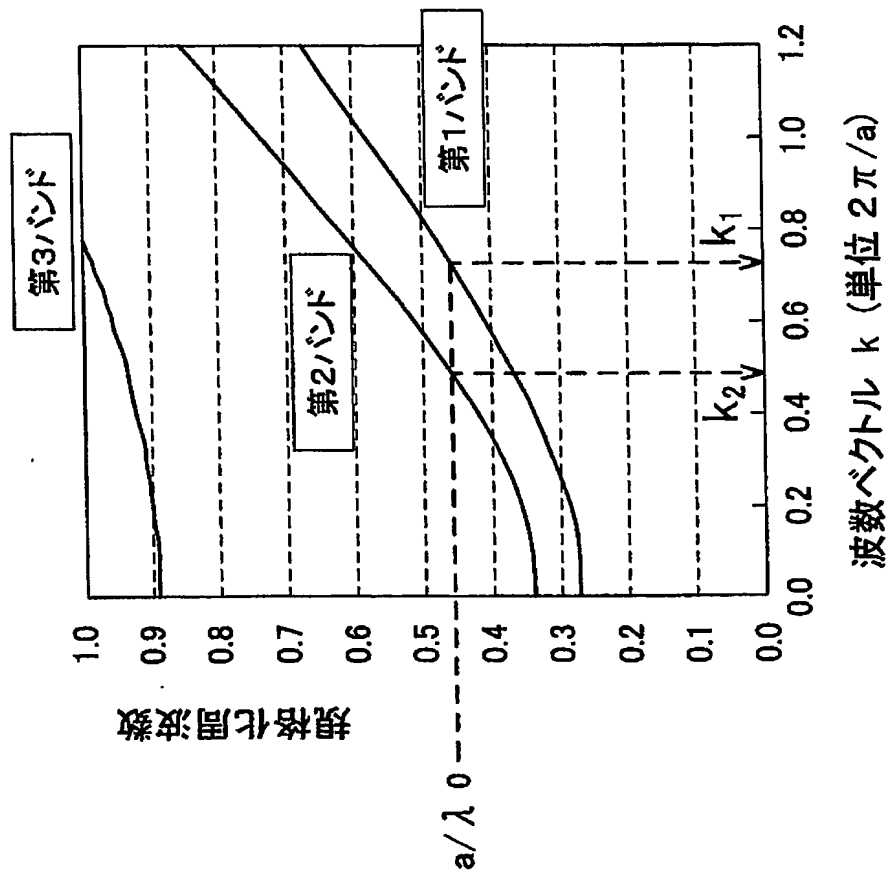
【図 5】



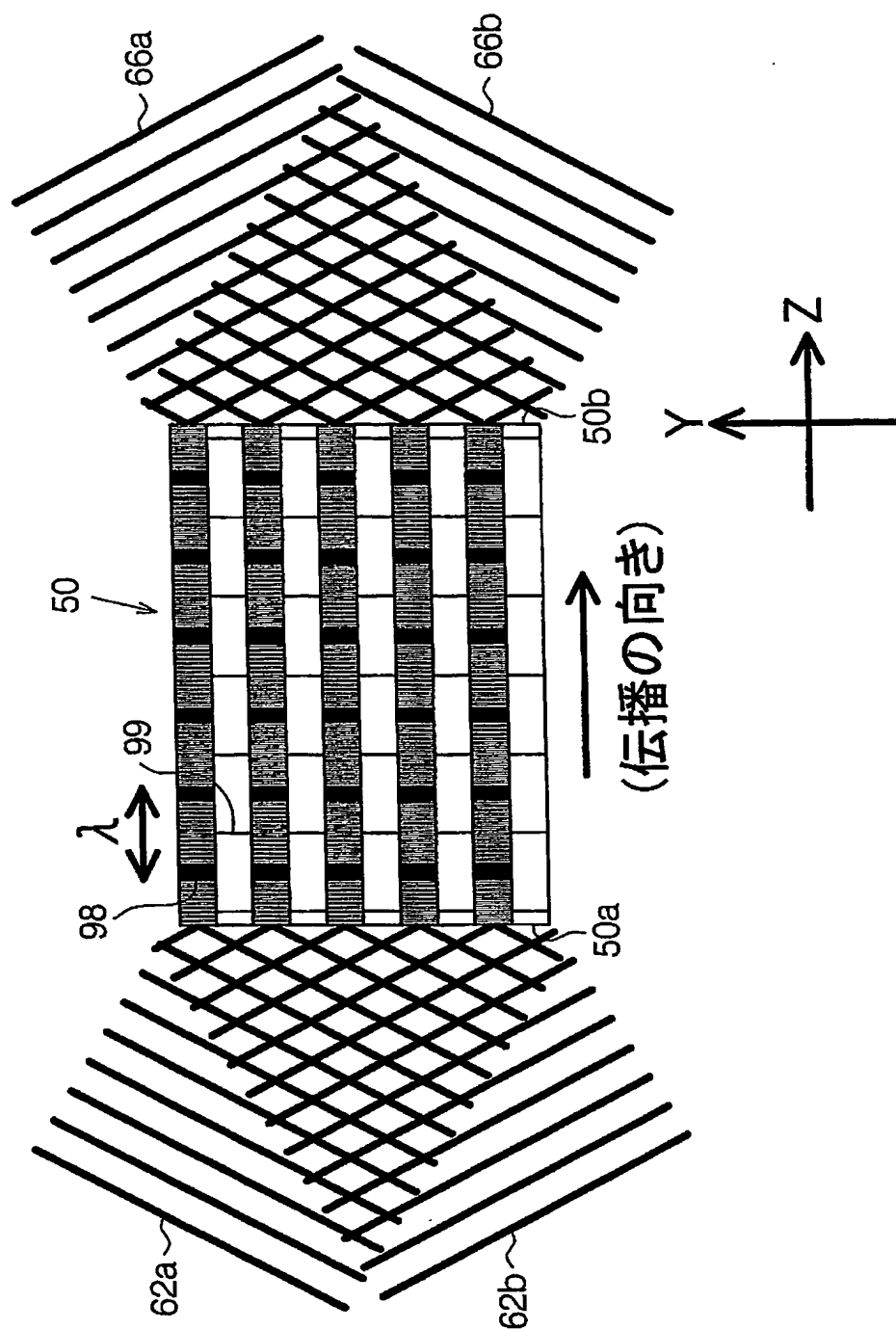
【図 6】



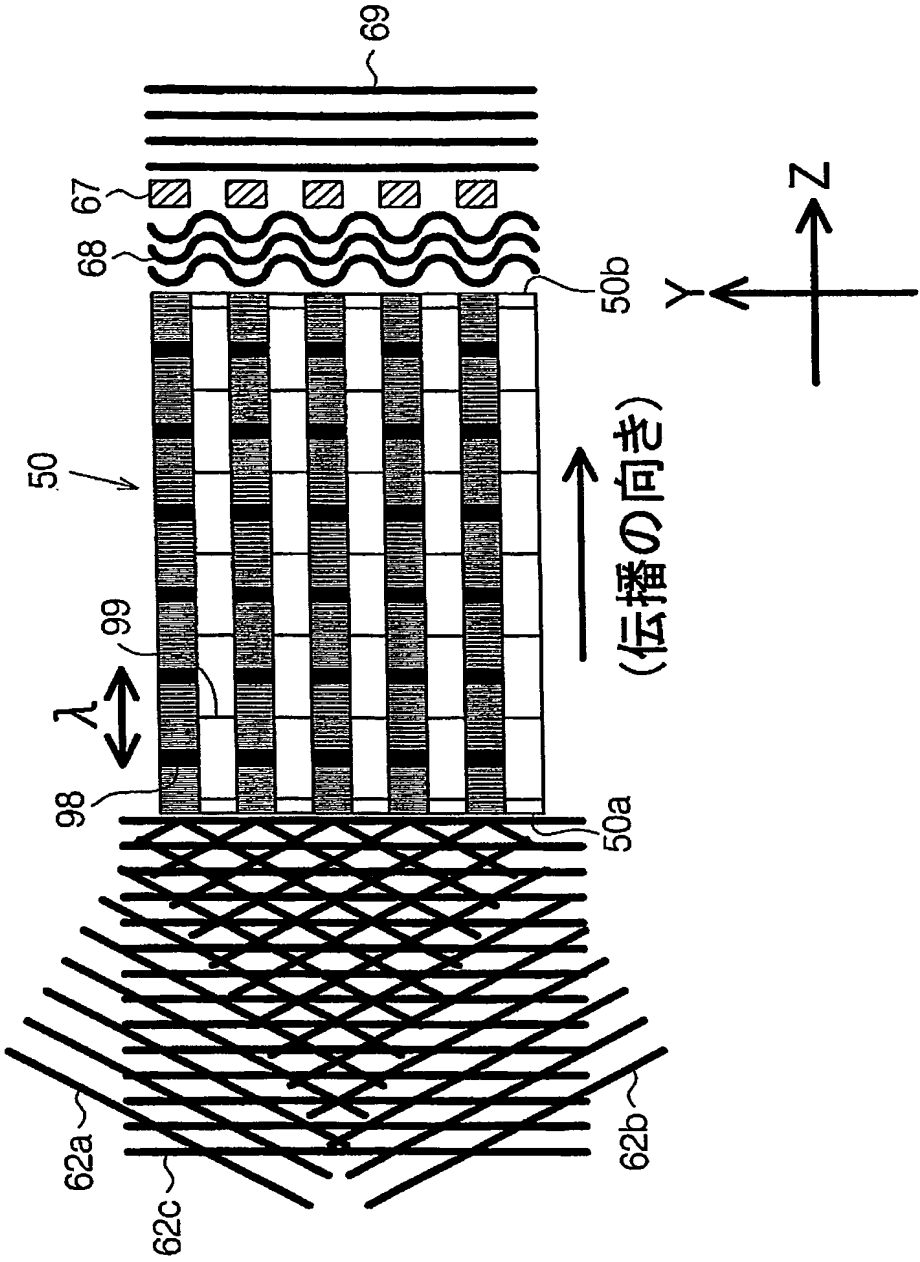
【図 7】



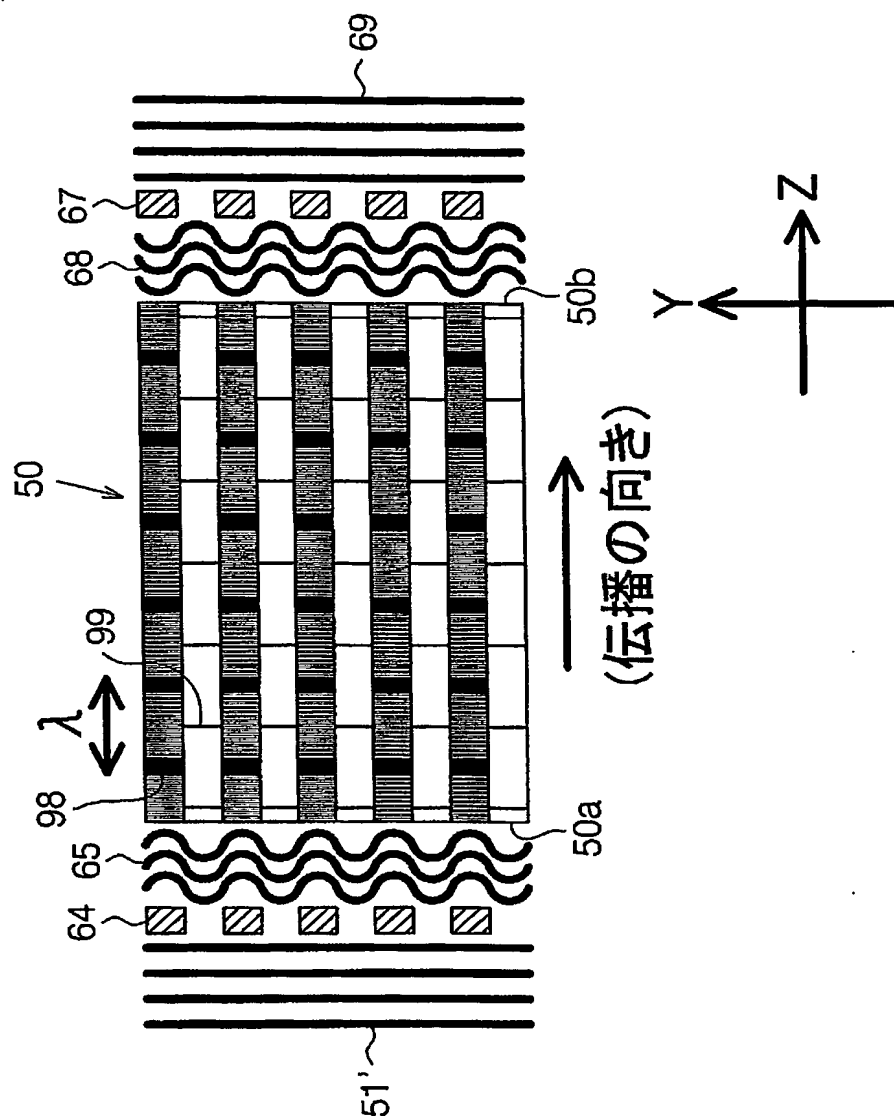
【図 8】



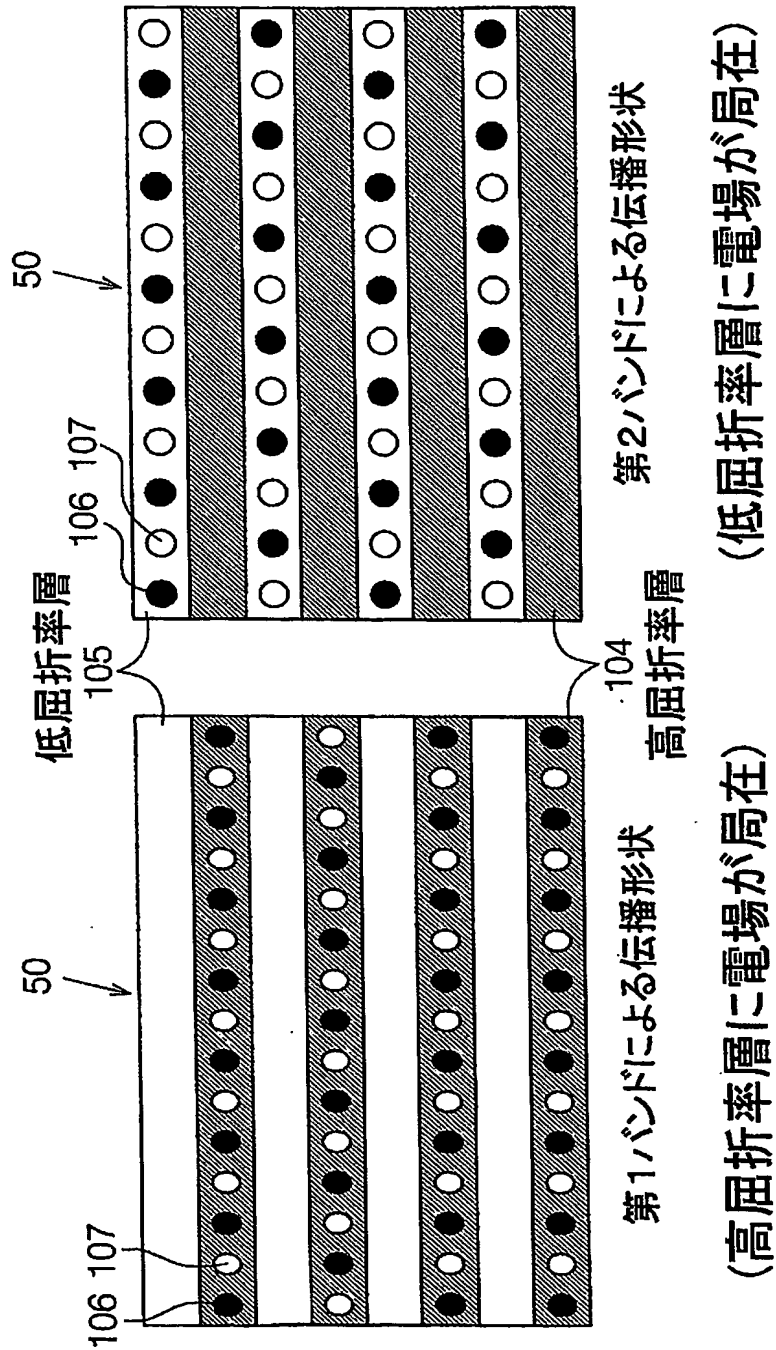
【図 9】



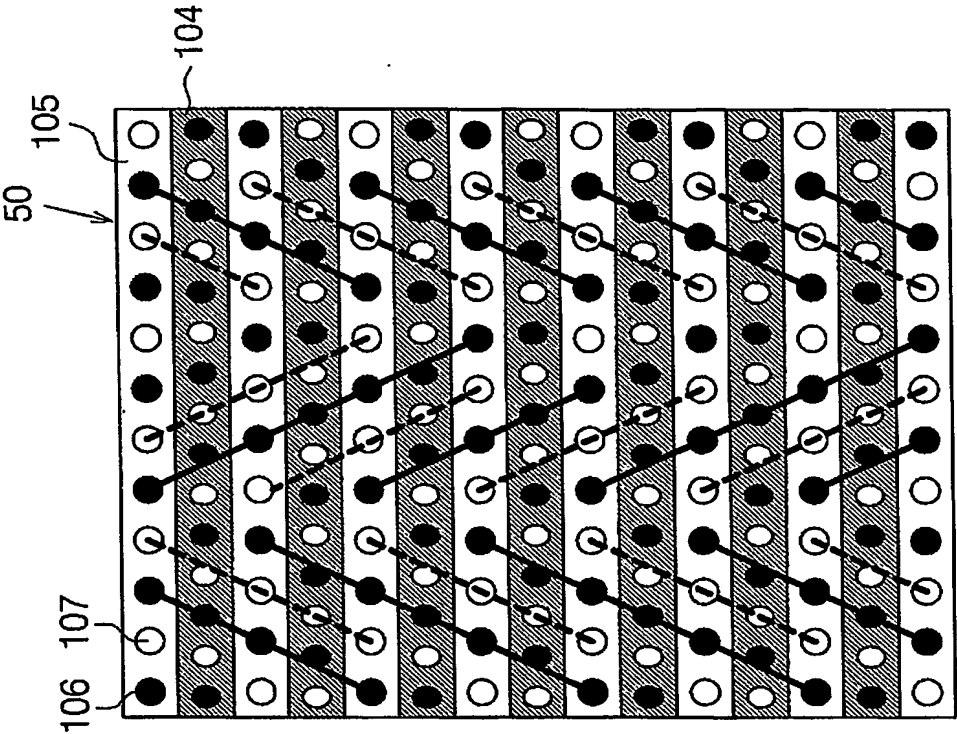
【図 10】



【図11】

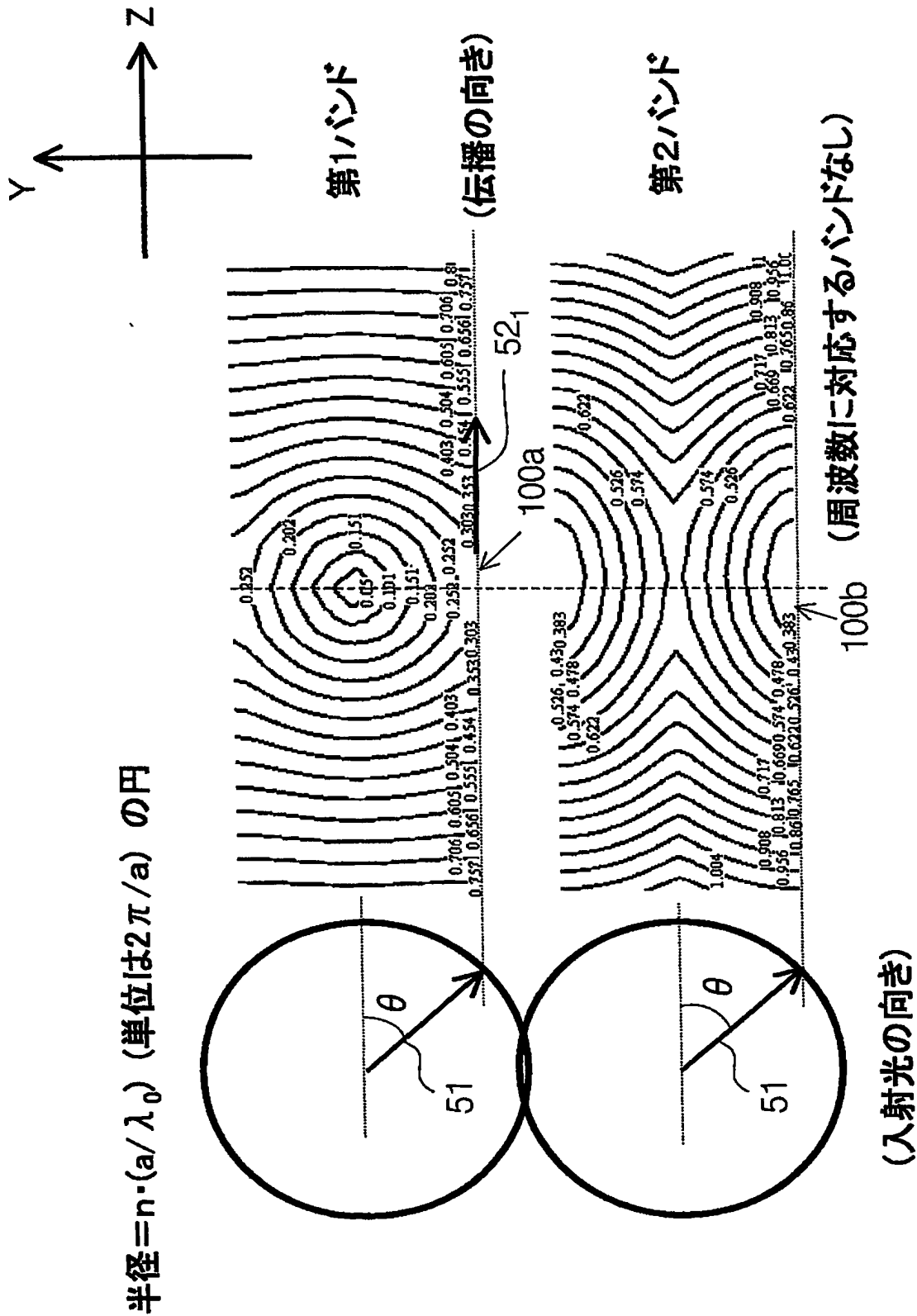


【図12】

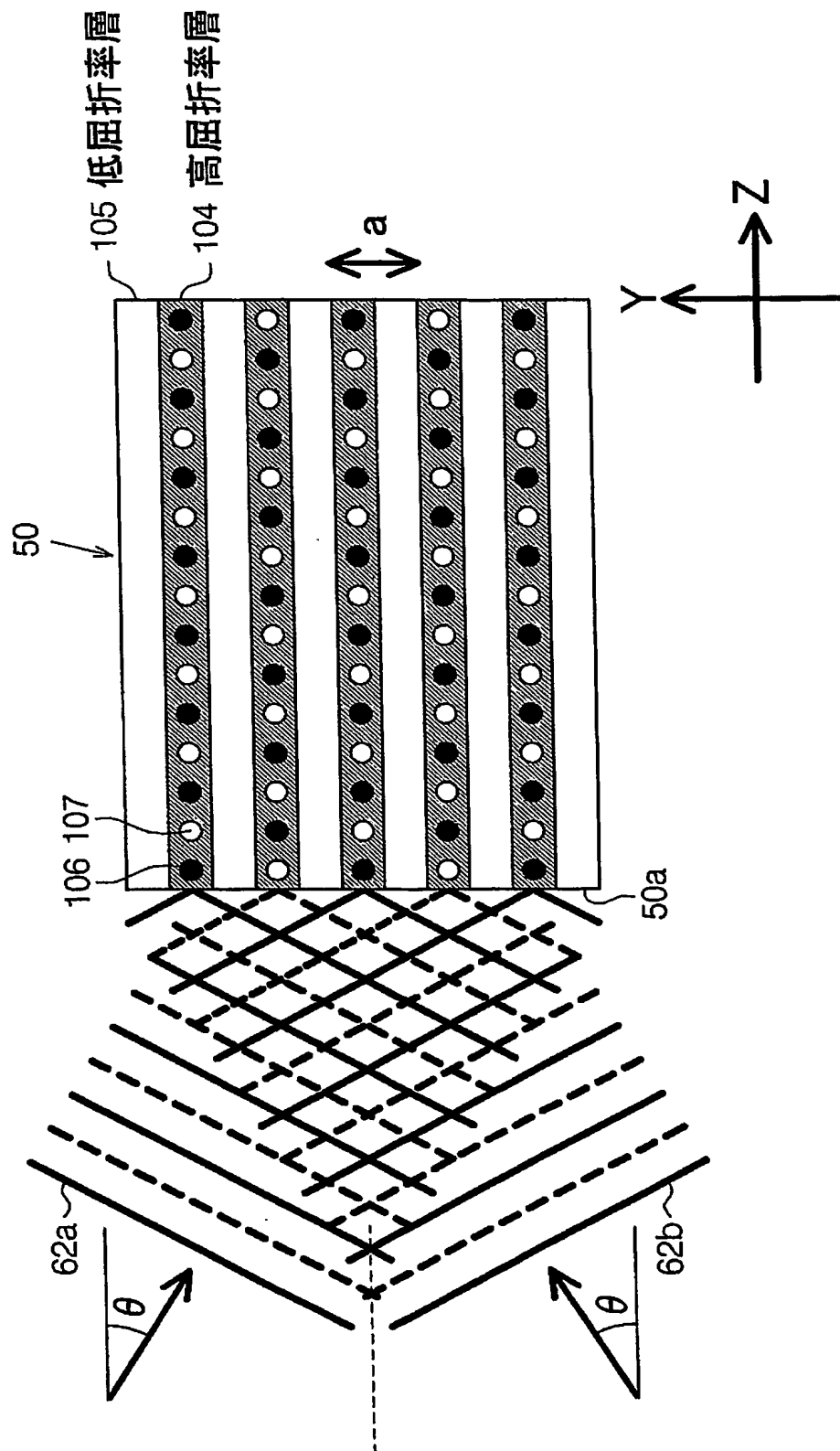


第1バンド + 第2バンドによる伝播形状

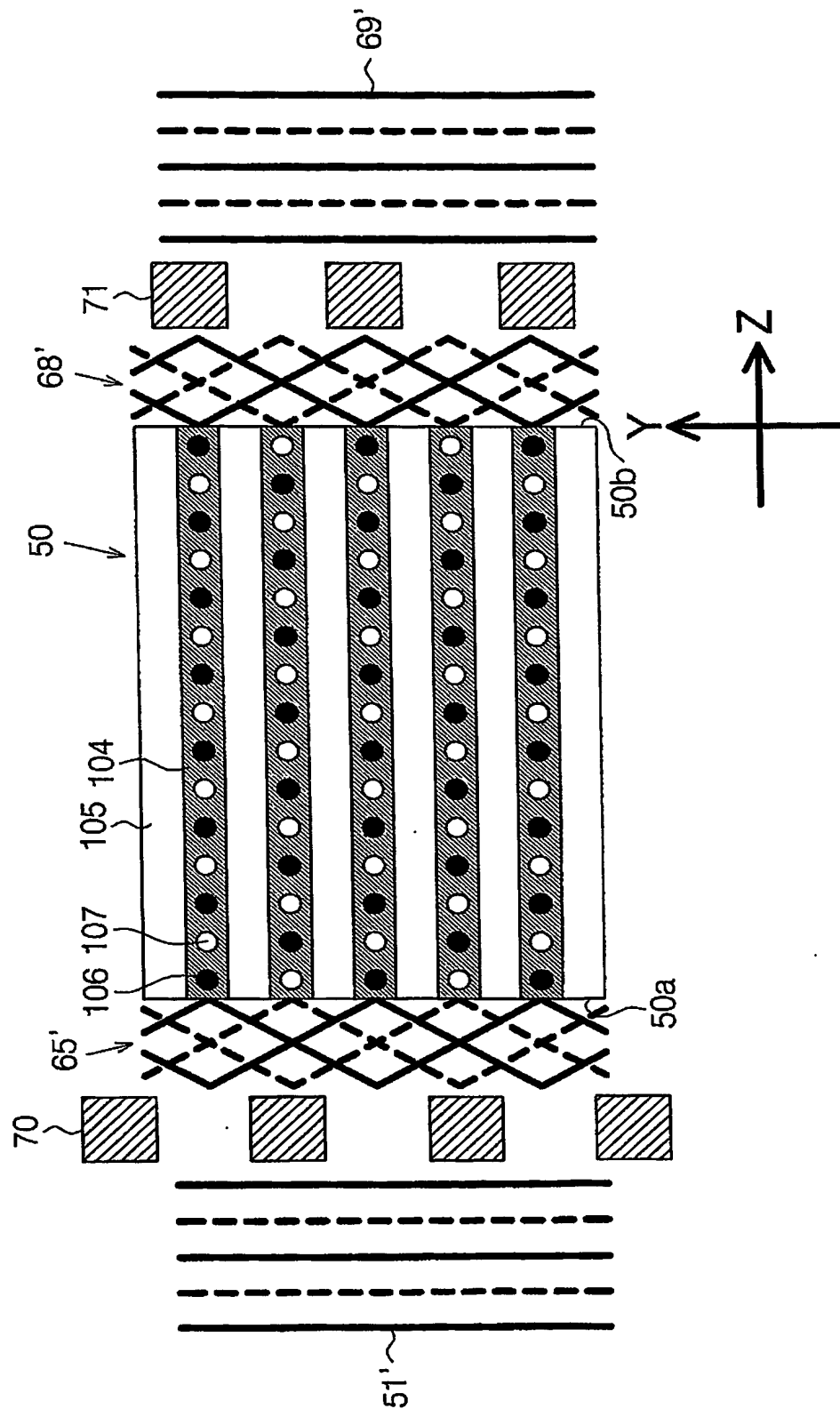
【図13】



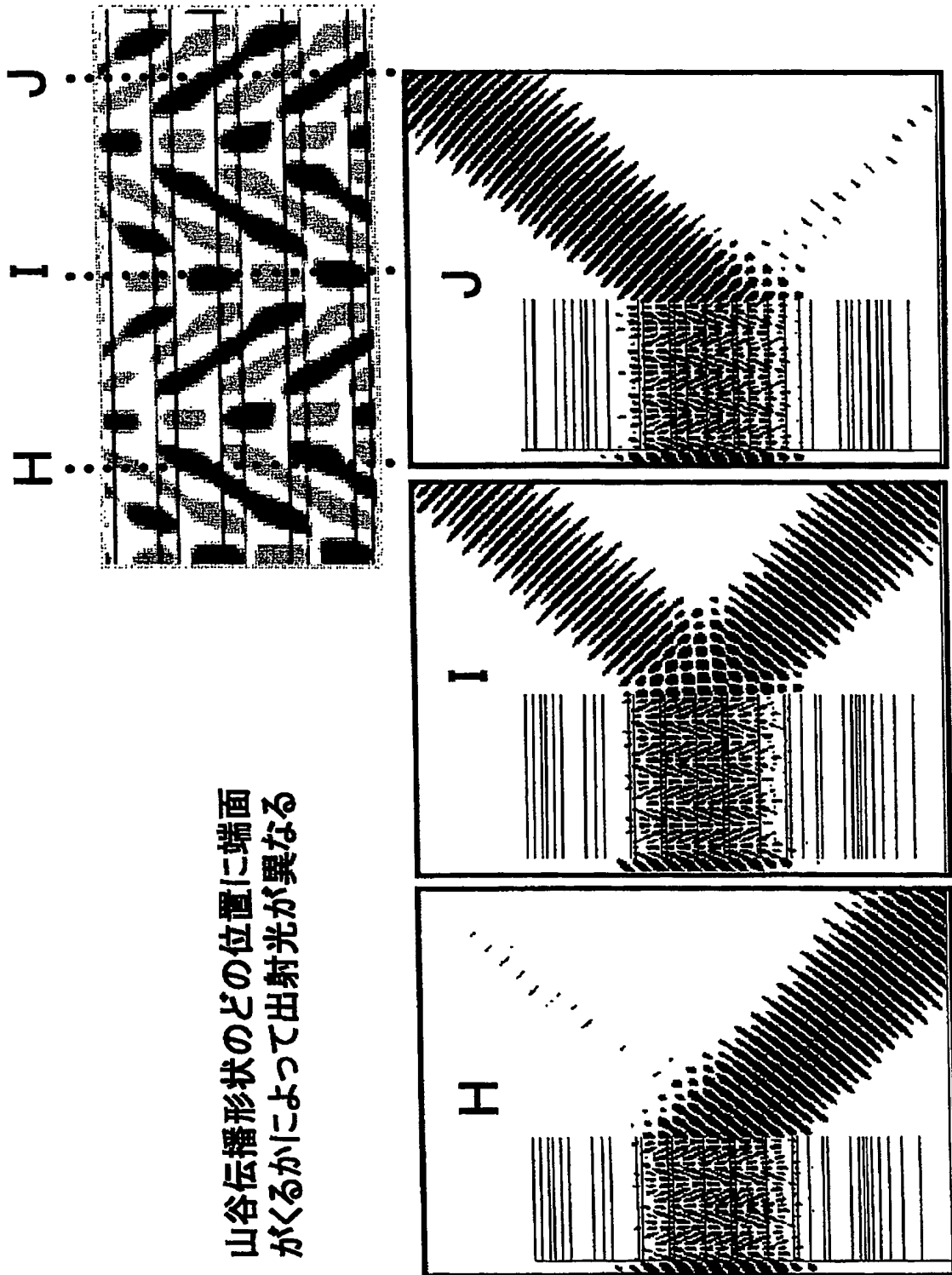
【図 14】



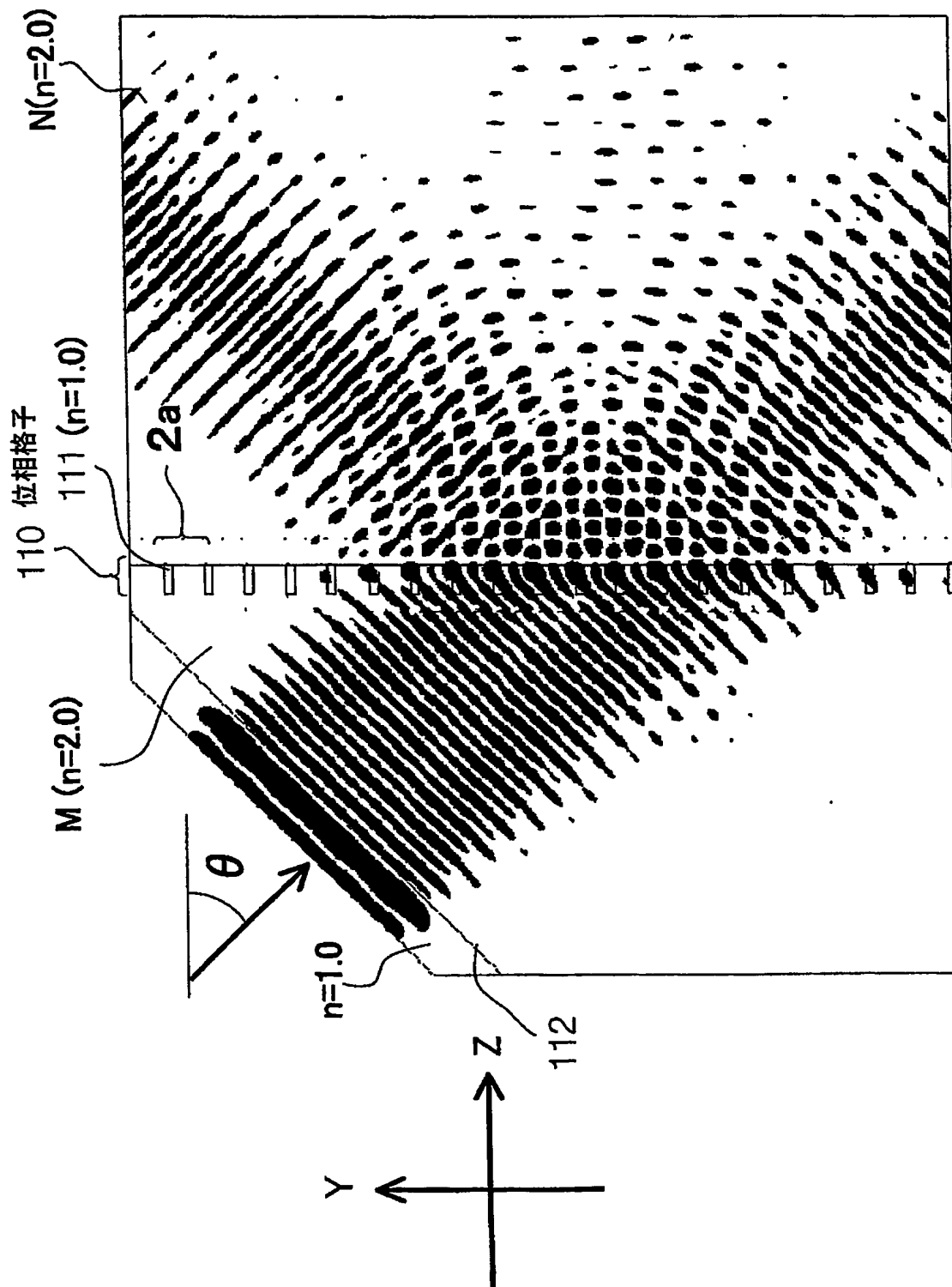
【図 15】



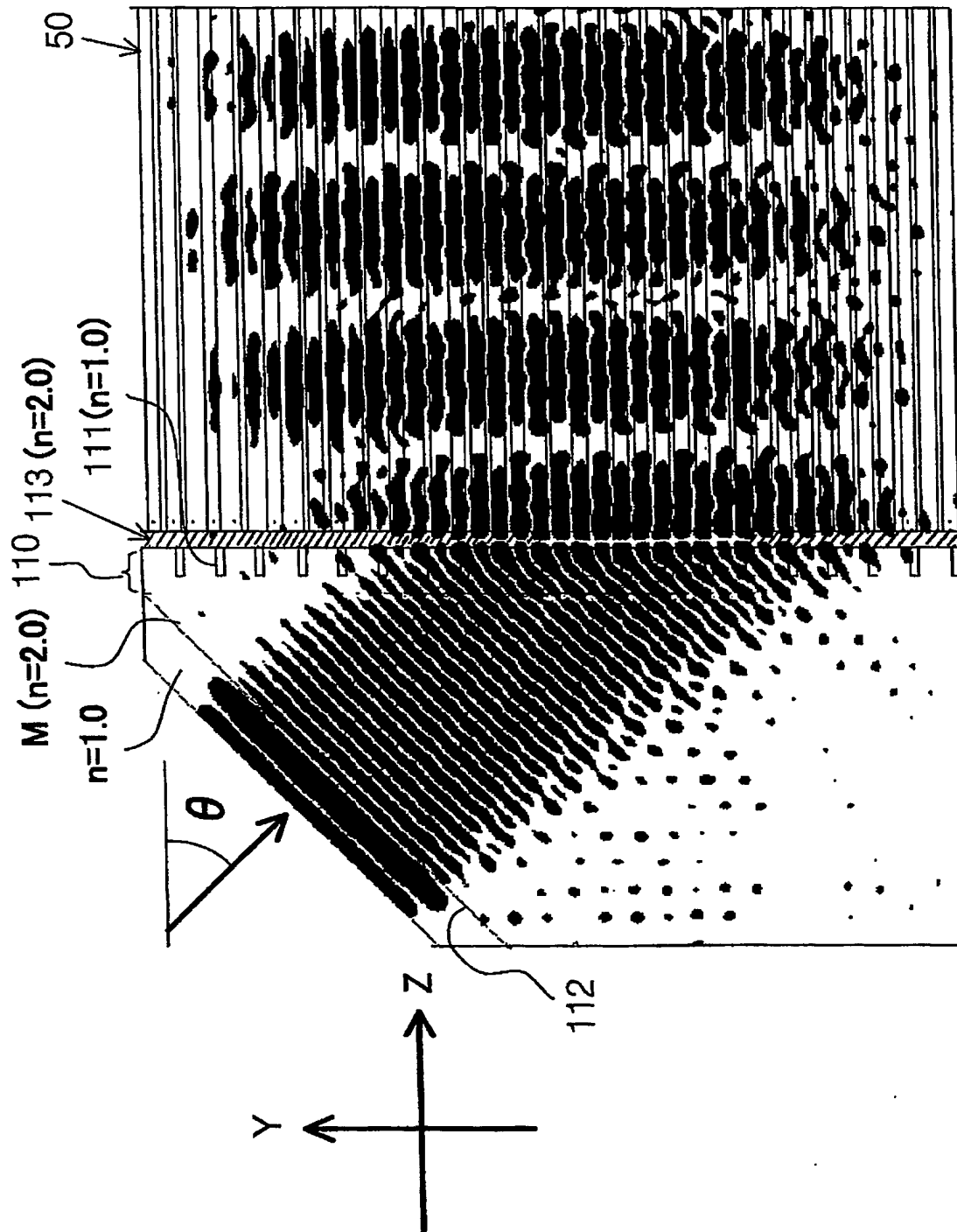
【図16】



【図 17】

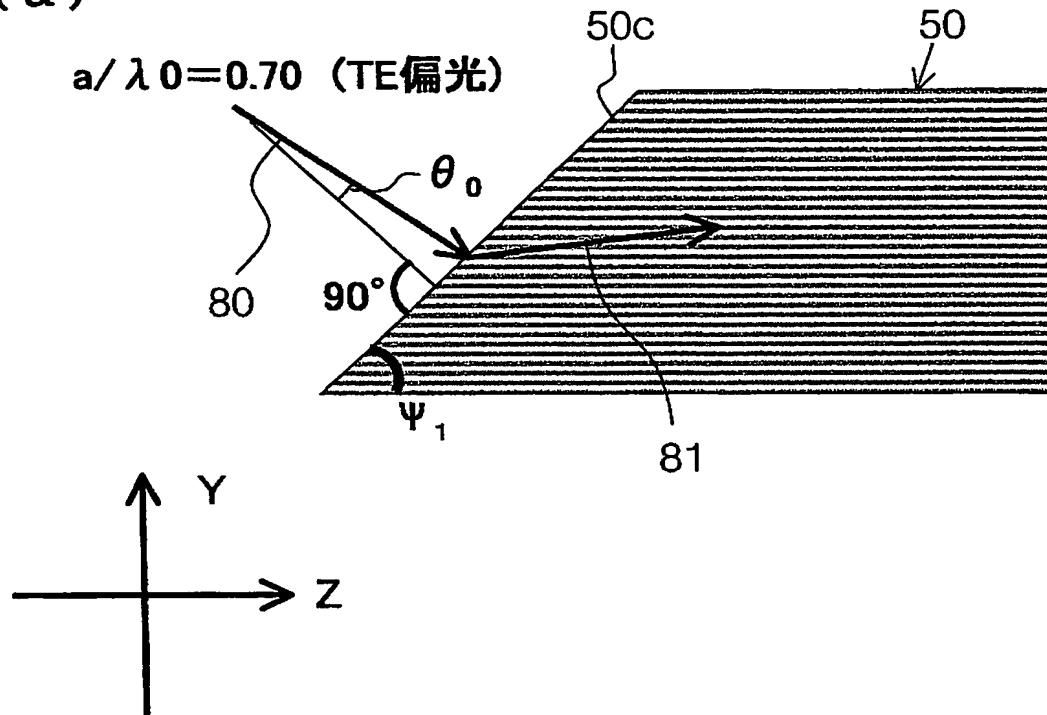


【図 18】

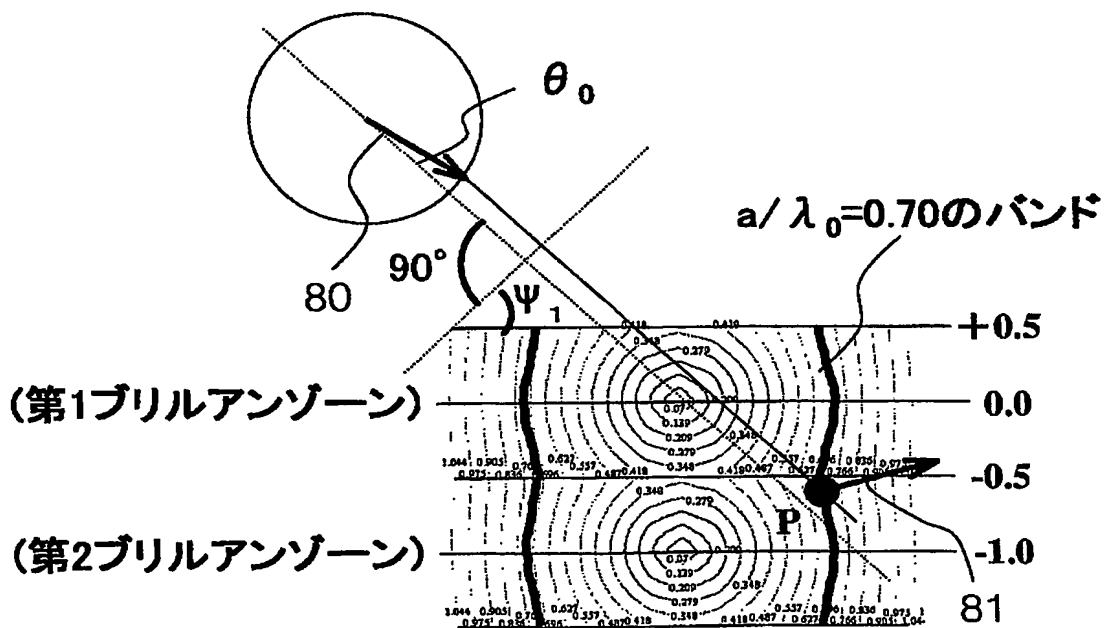


【図 19】

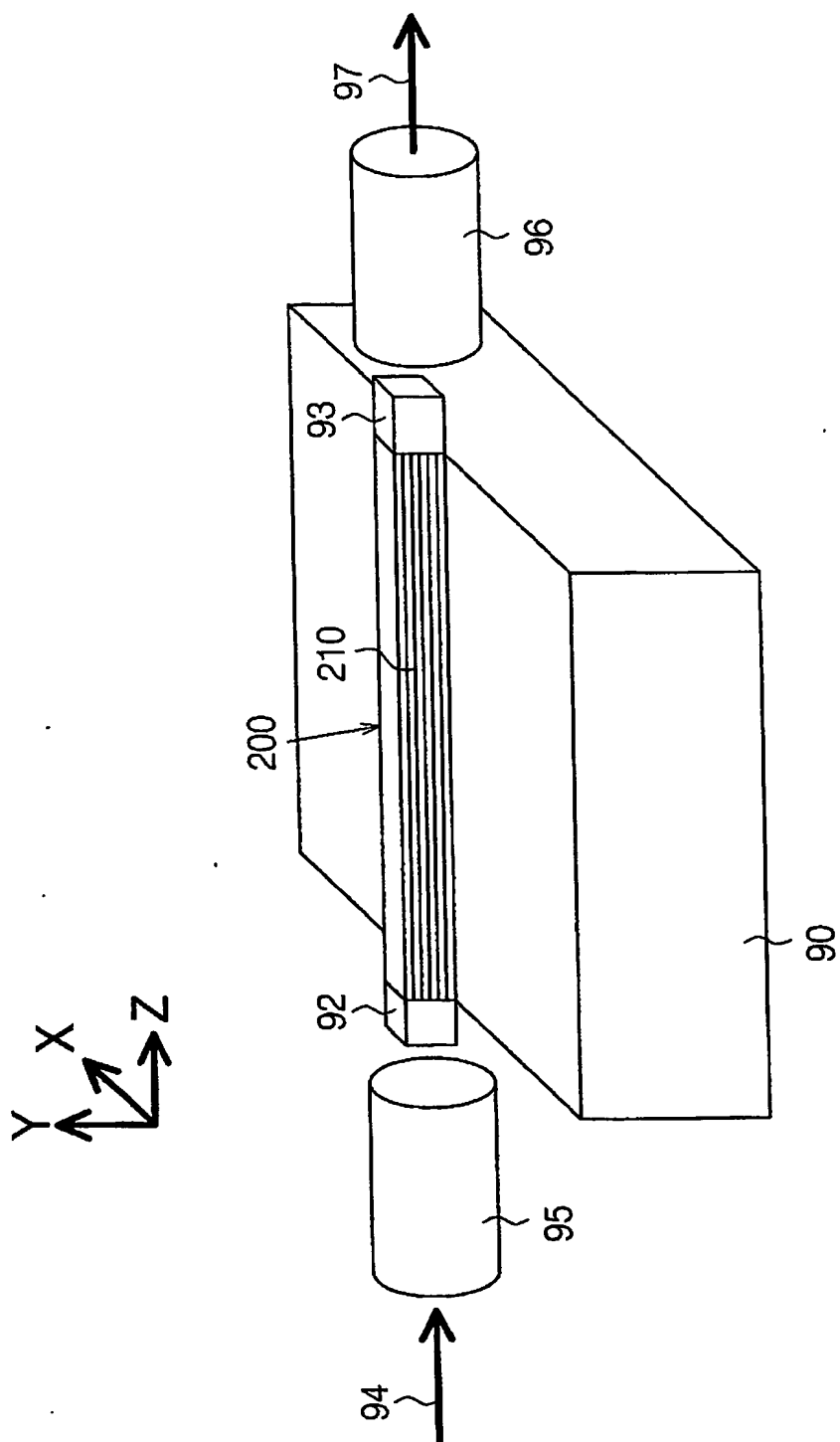
(a)



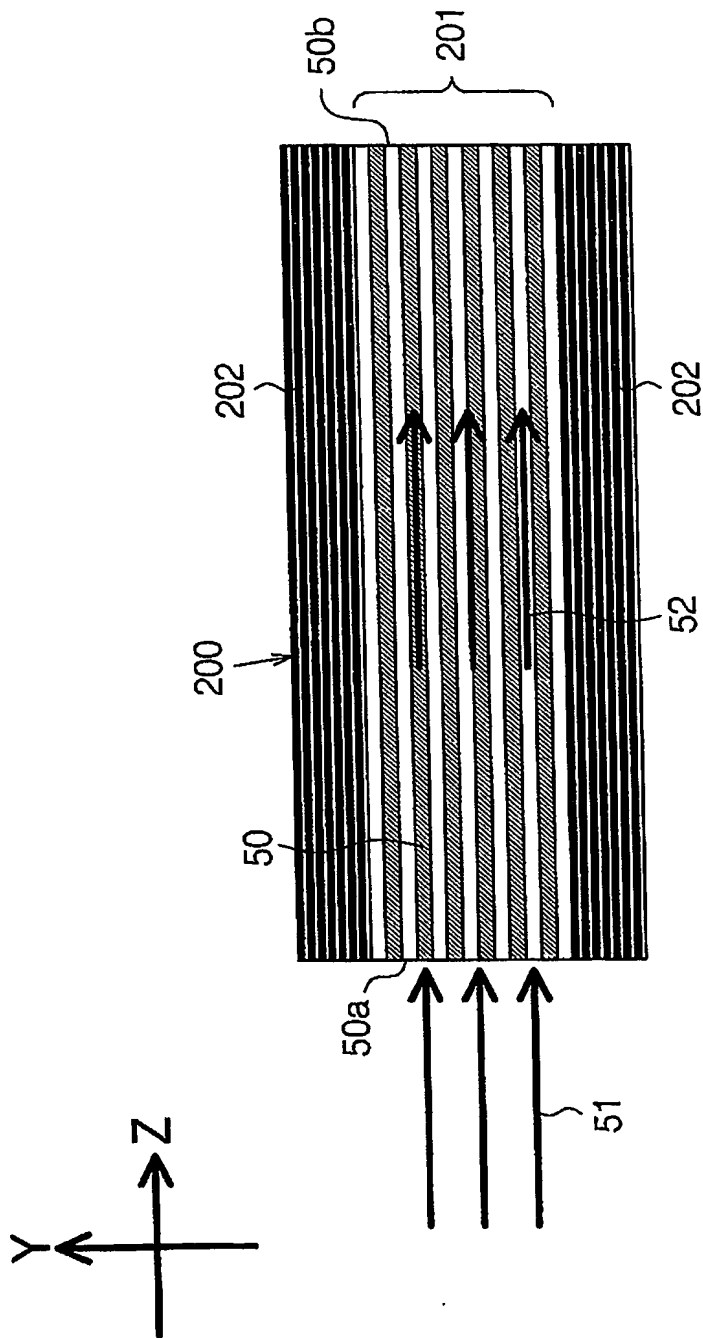
(b) (半径0.70の円)



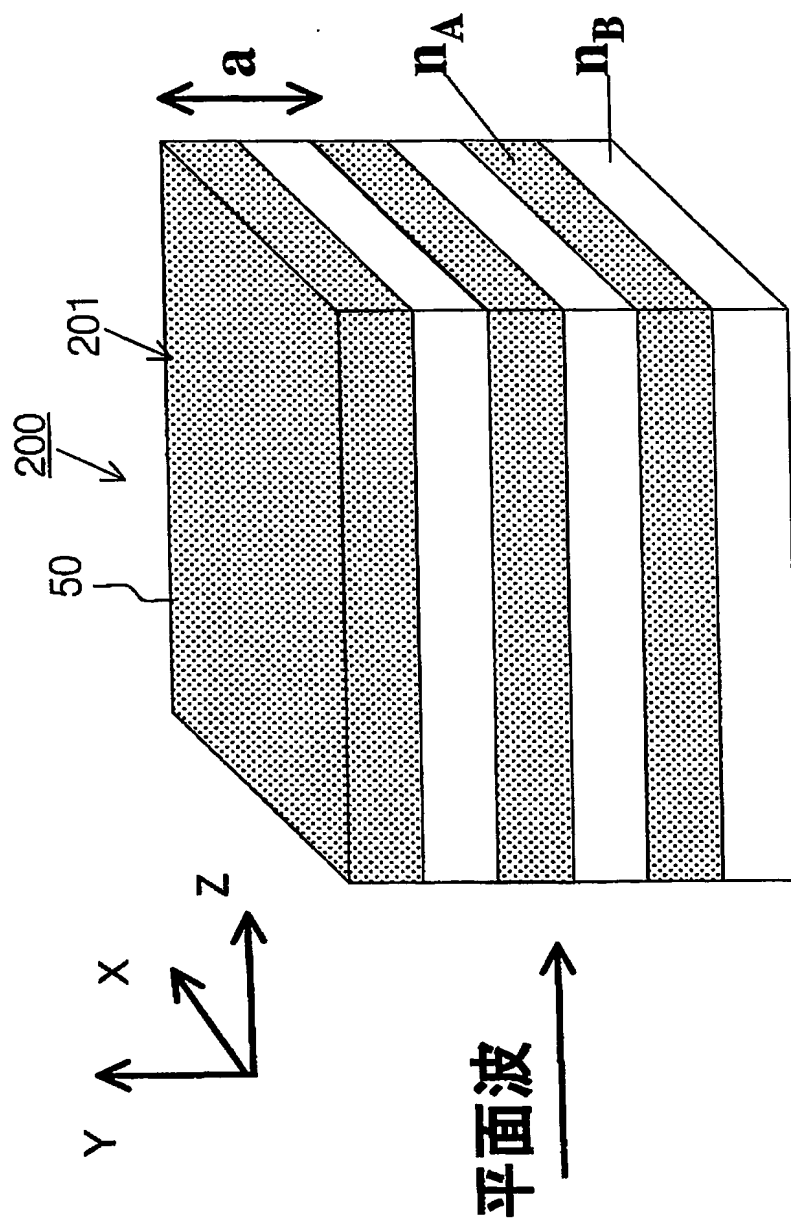
【図 20】



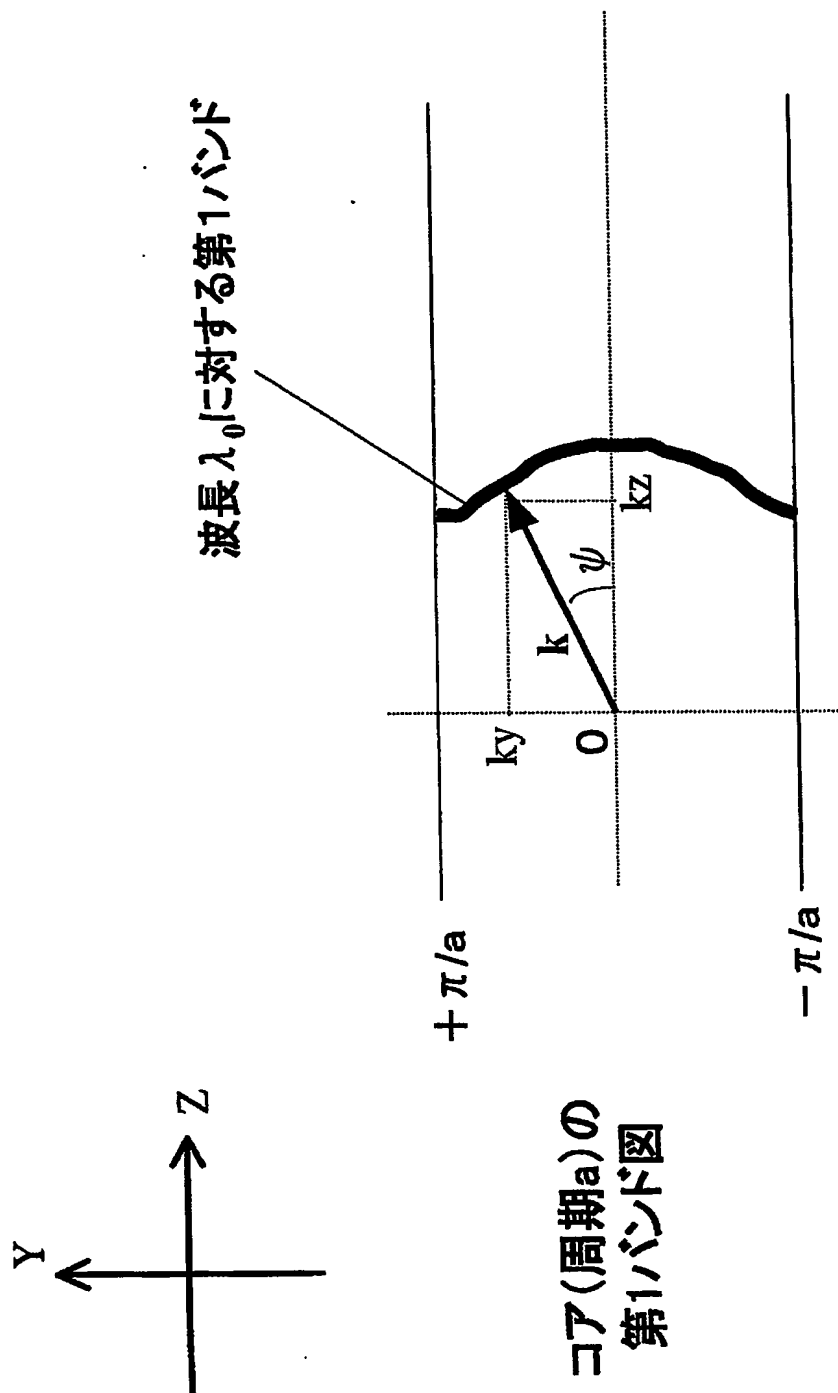
【図 21】



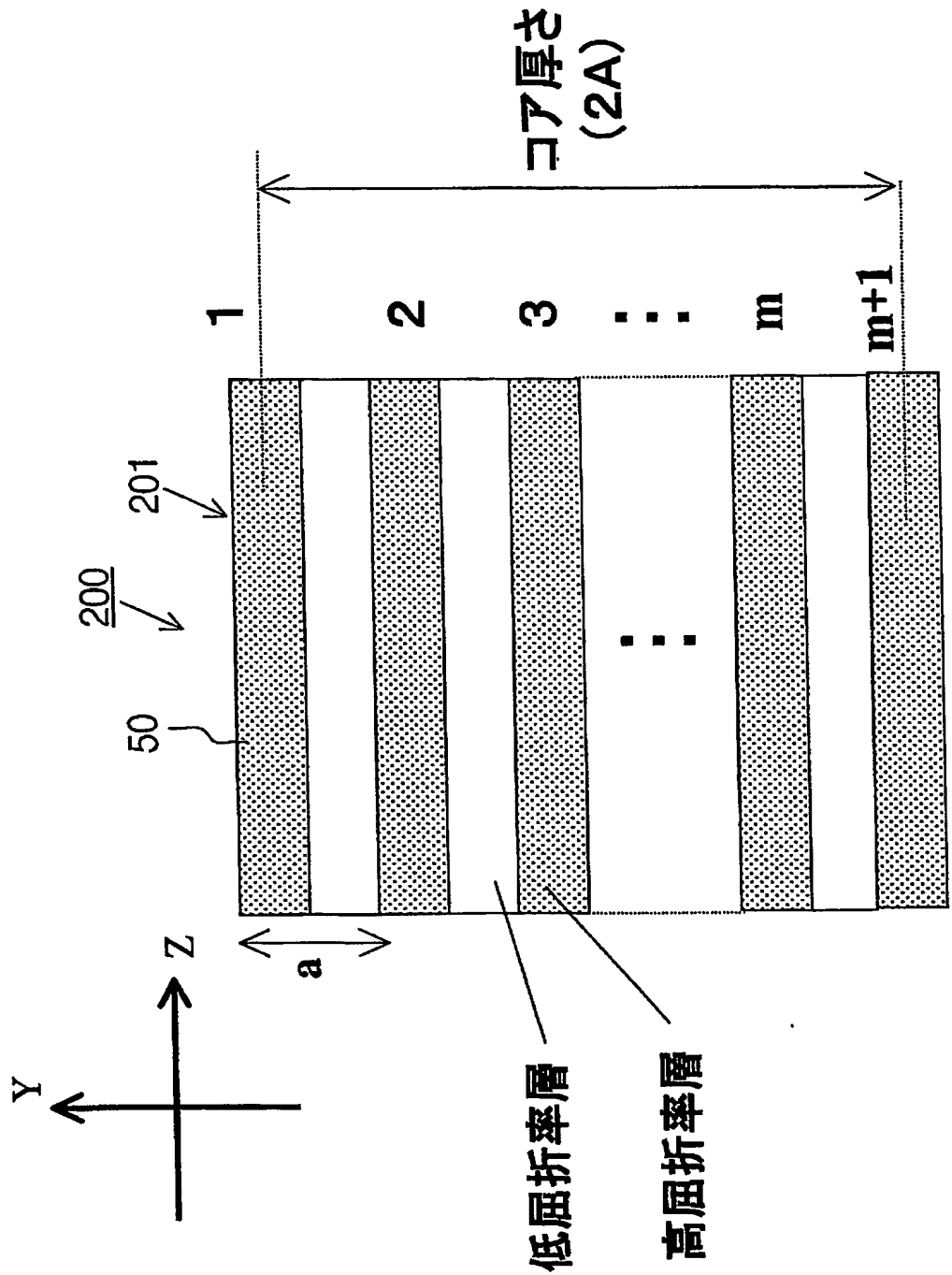
【図 22】



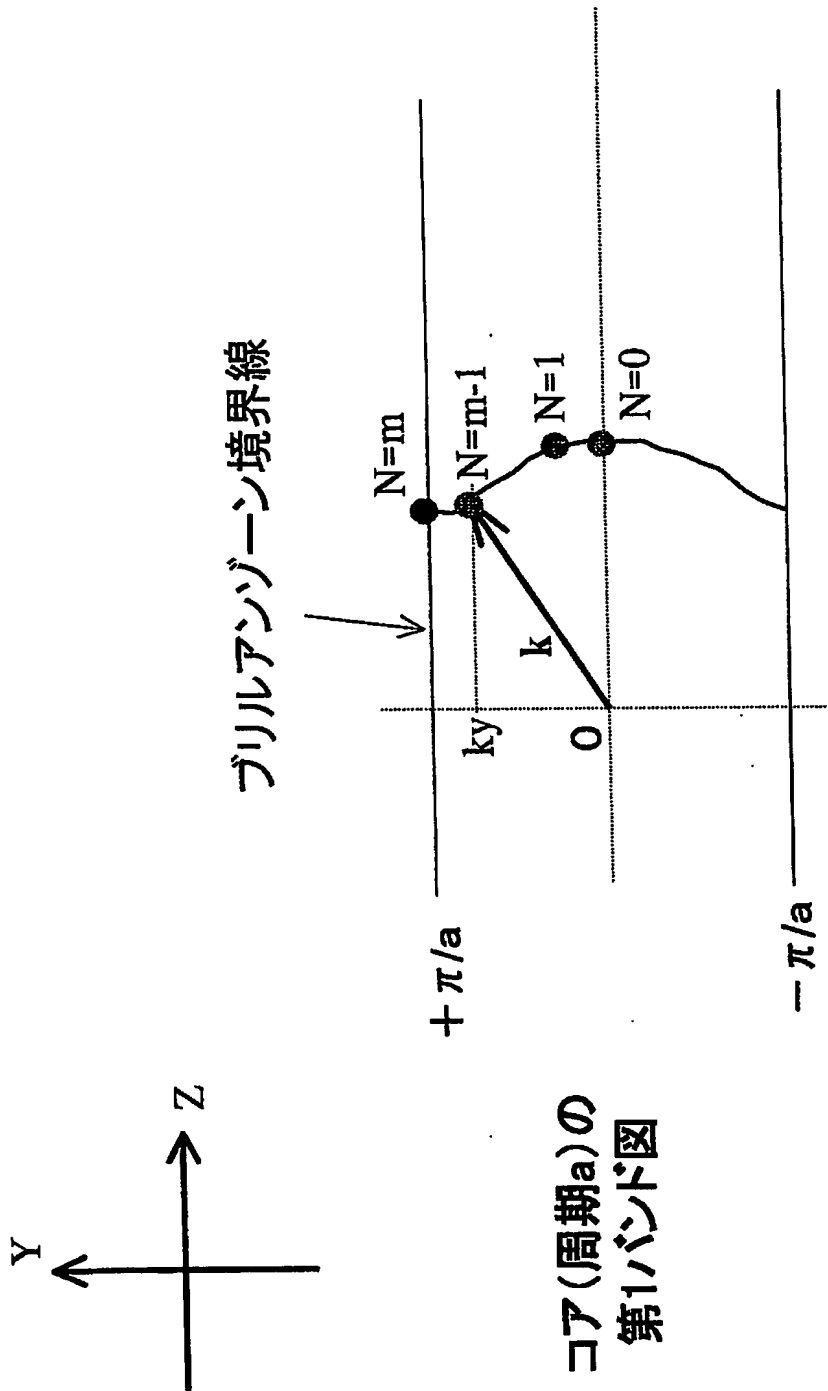
【図23】



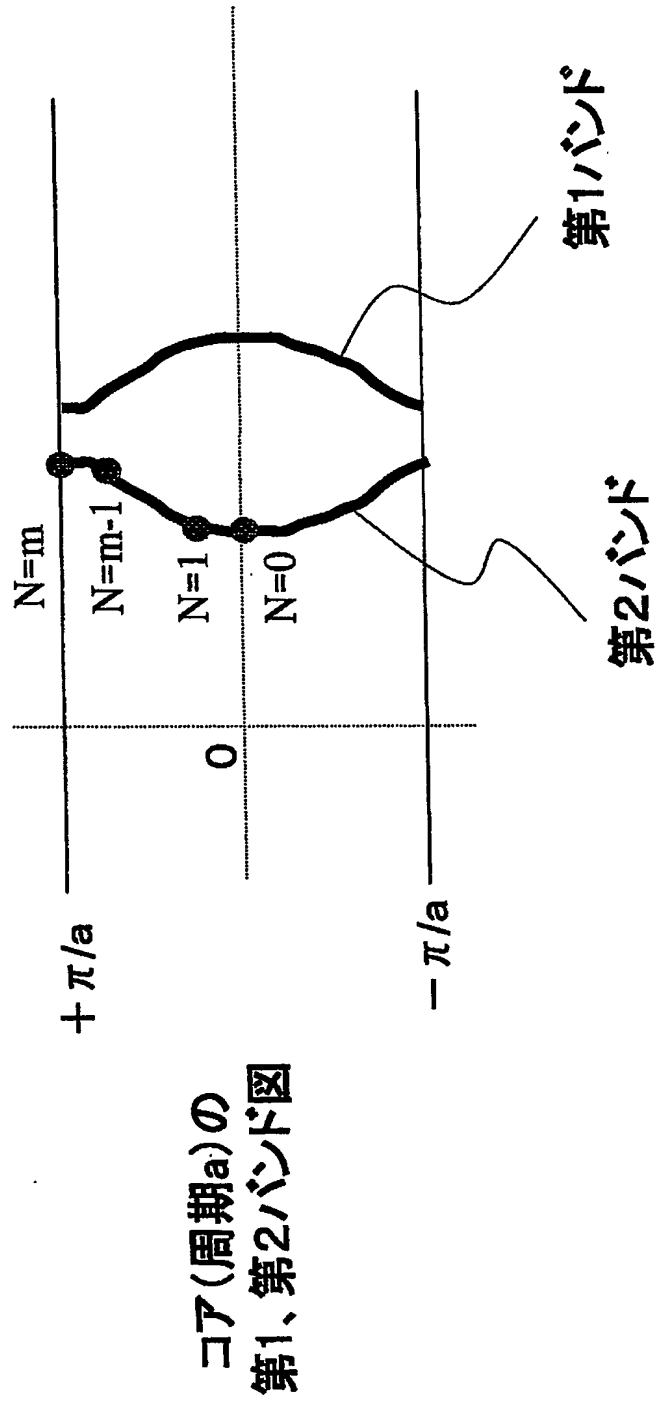
【図 24】



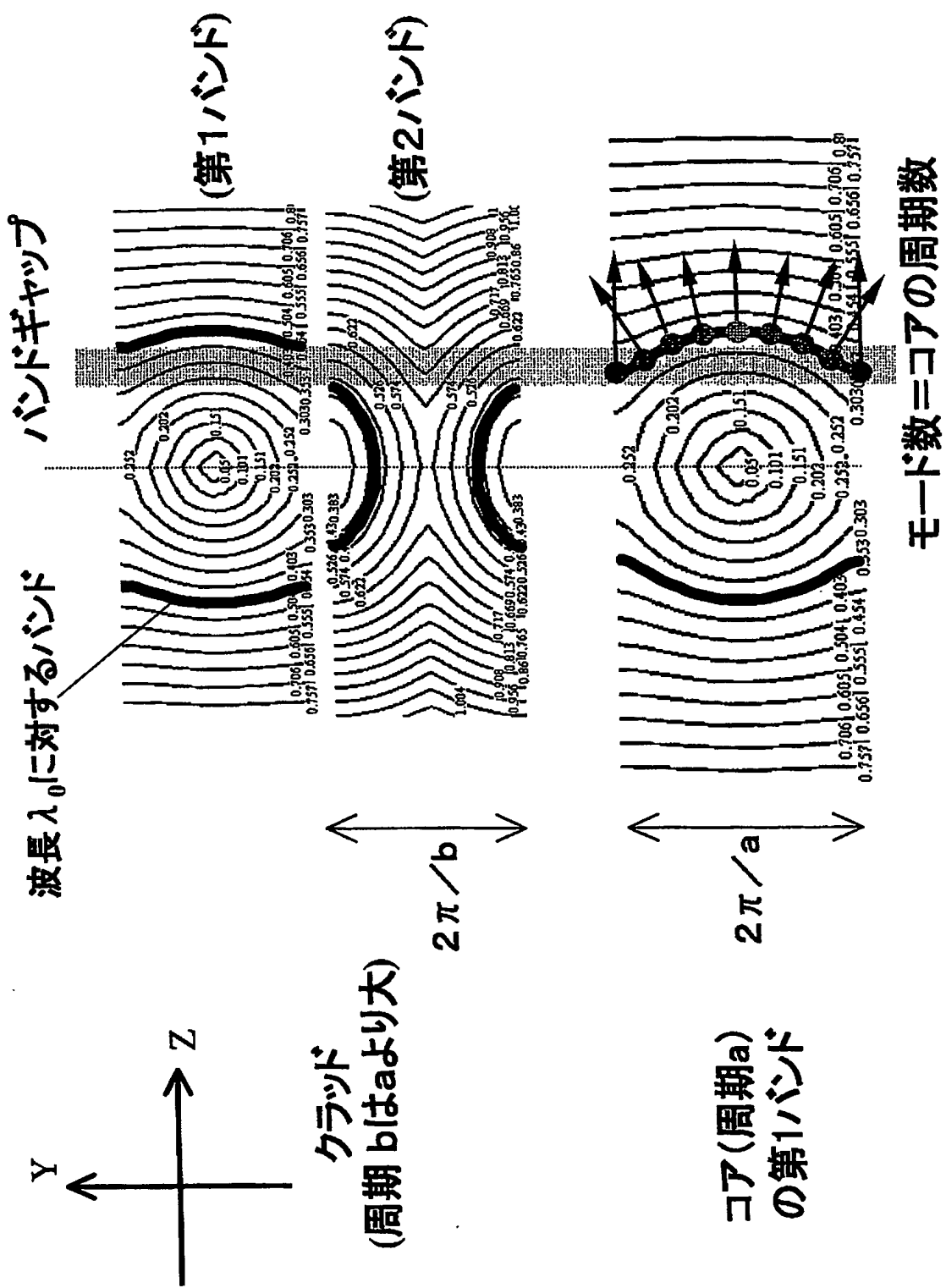
【図25】



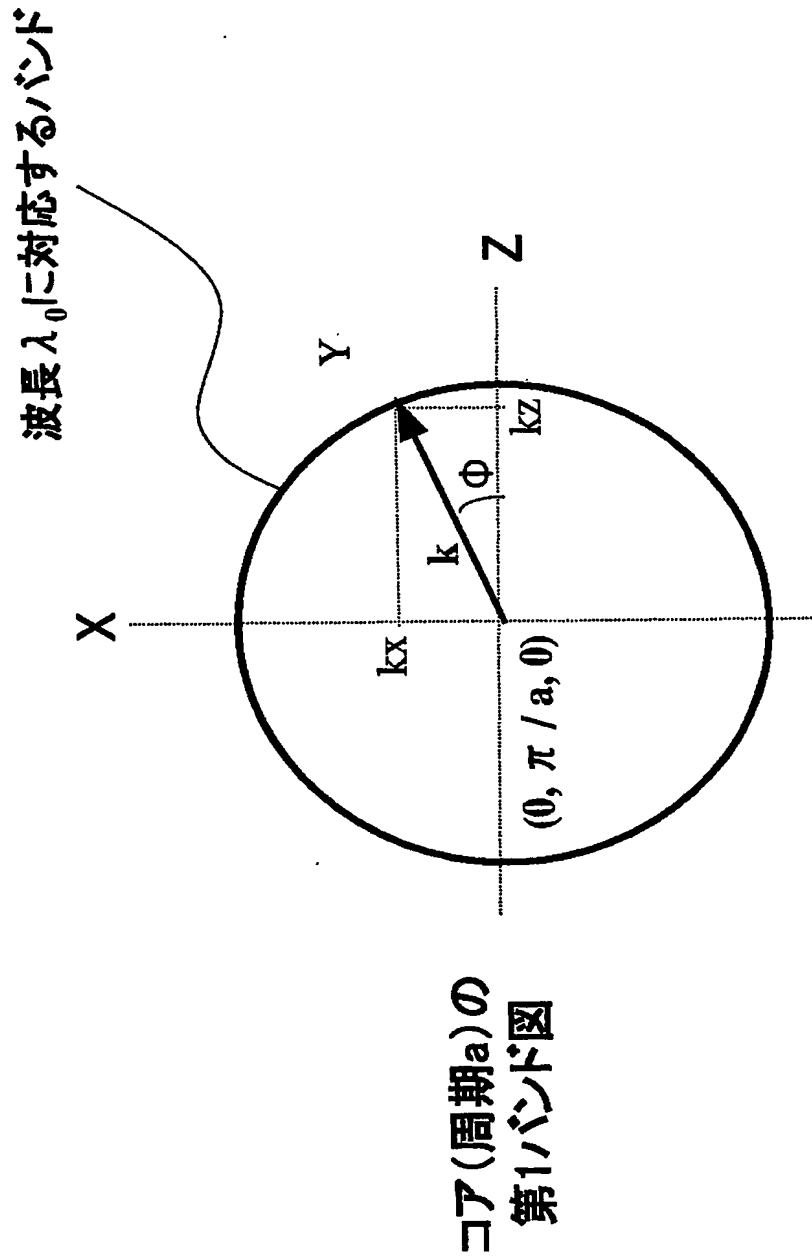
【図 26】



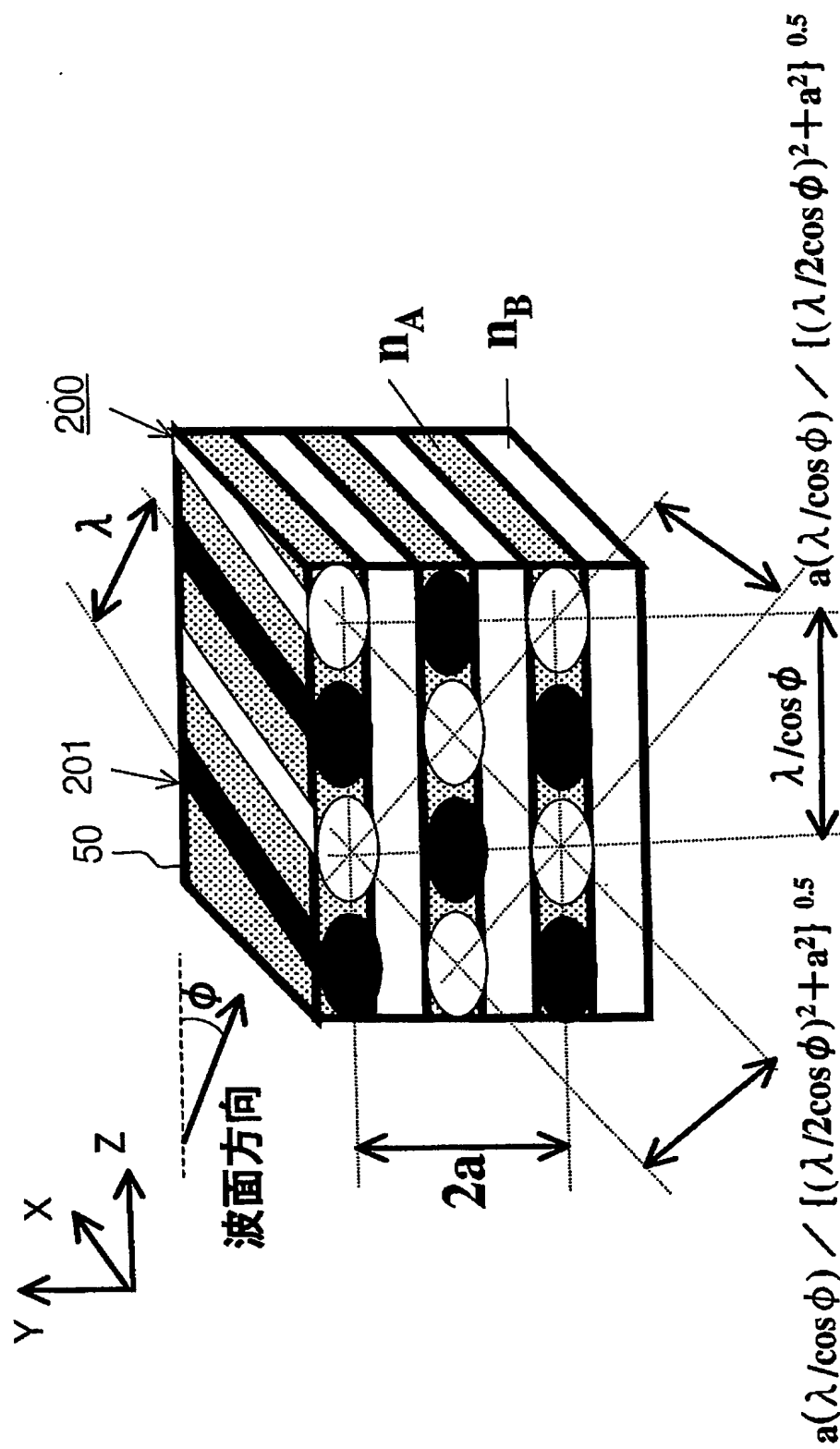
【図 27】



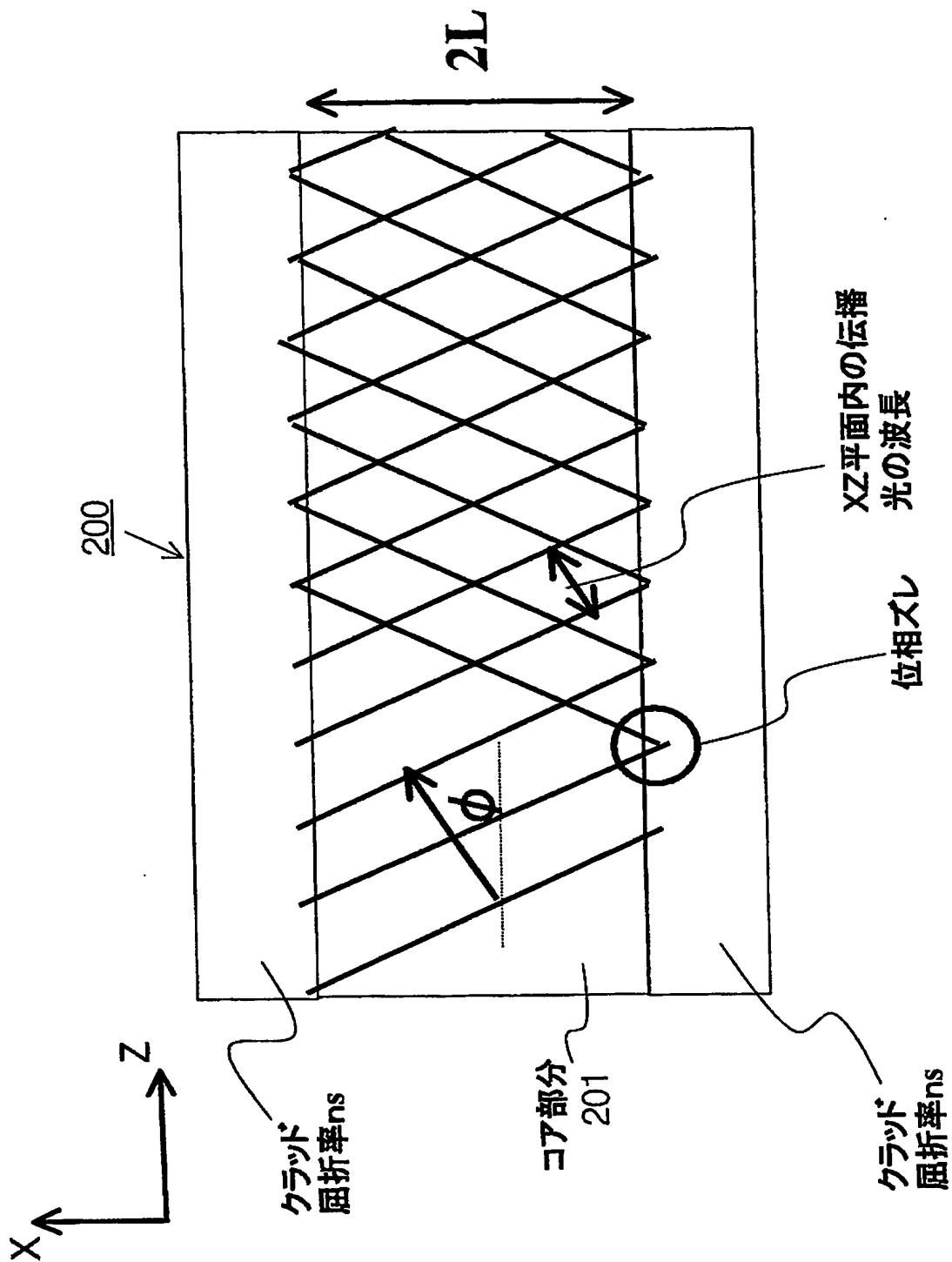
【図 28】



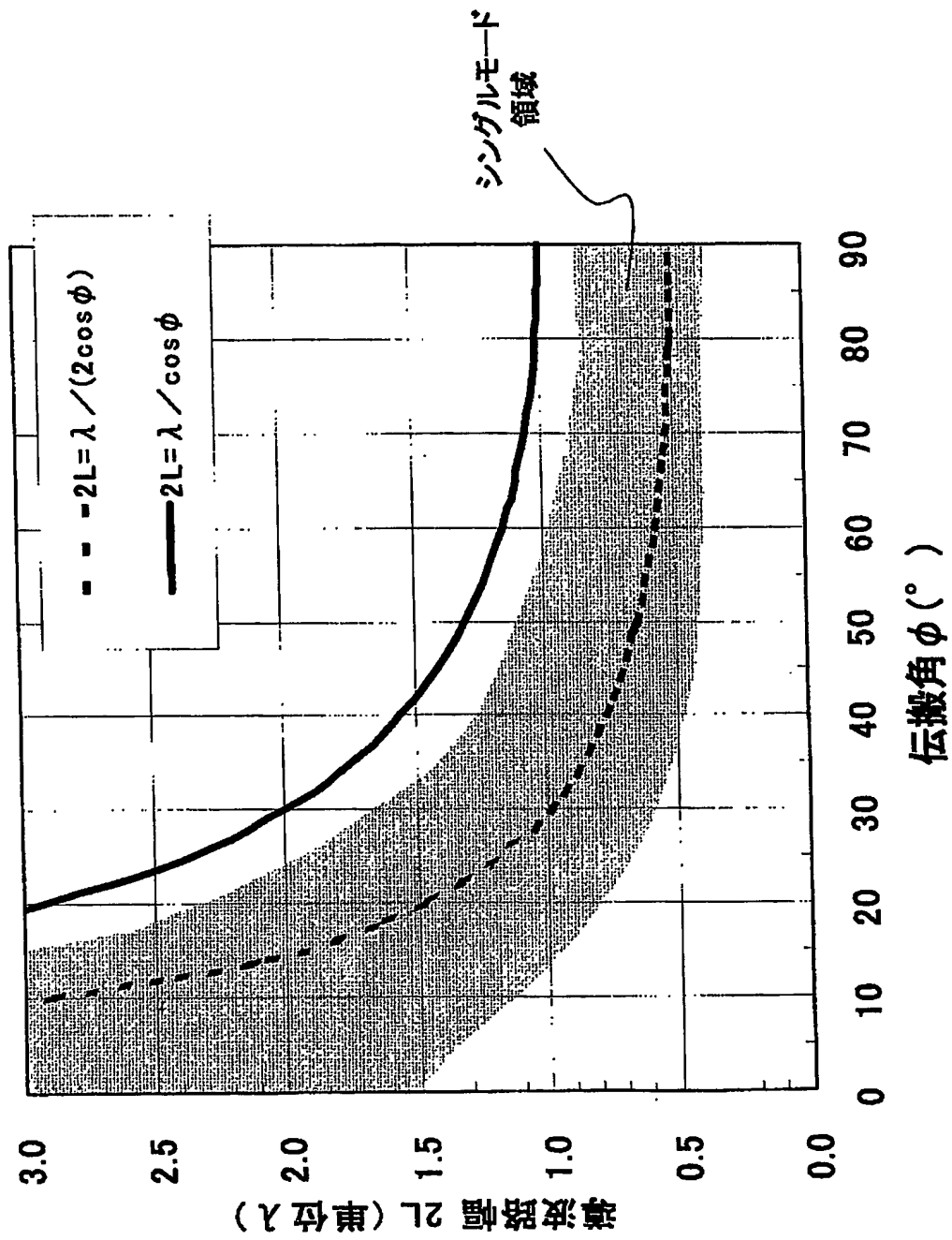
【図 30】



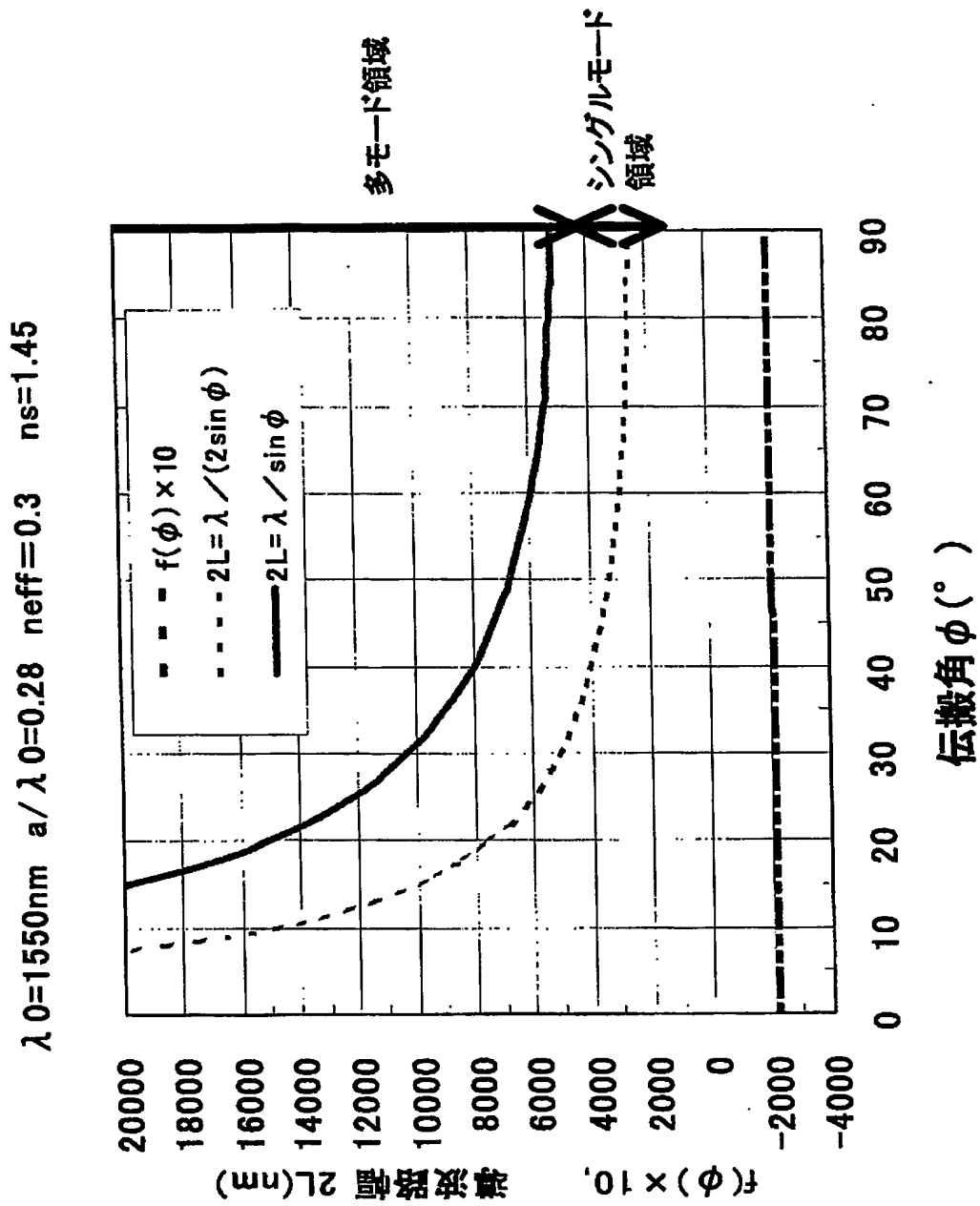
【図 31】



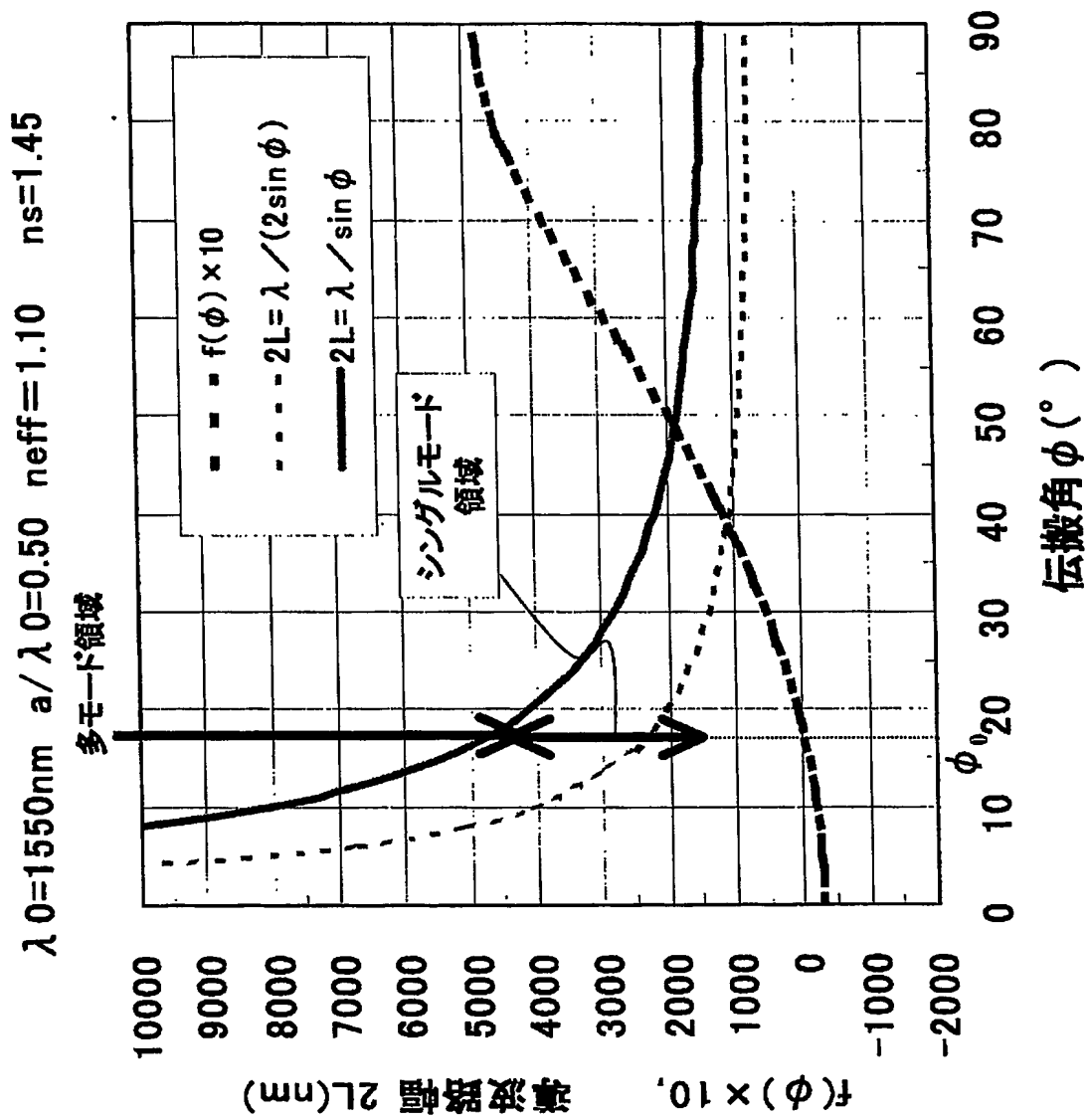
【図 32】



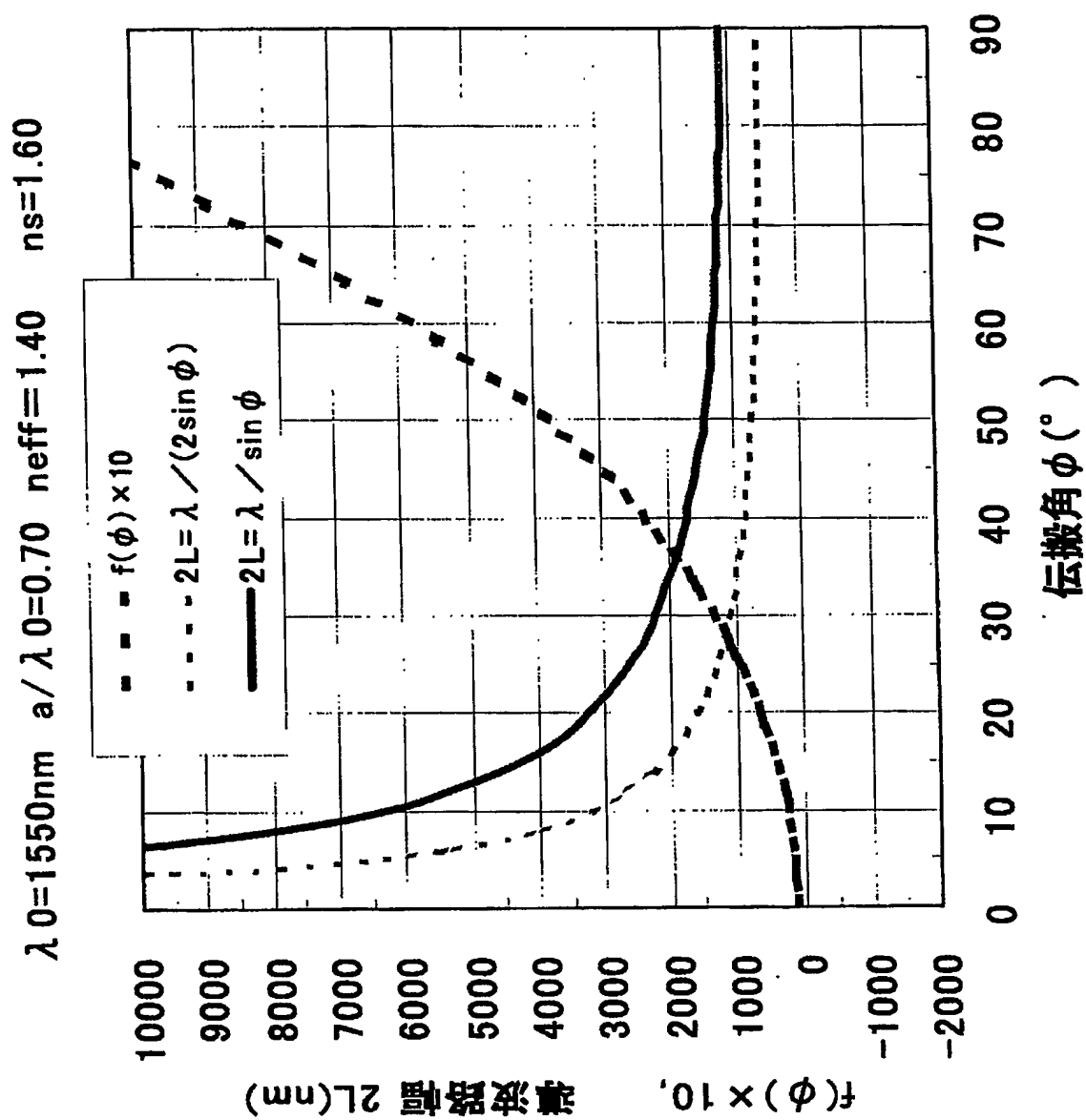
【図 33】



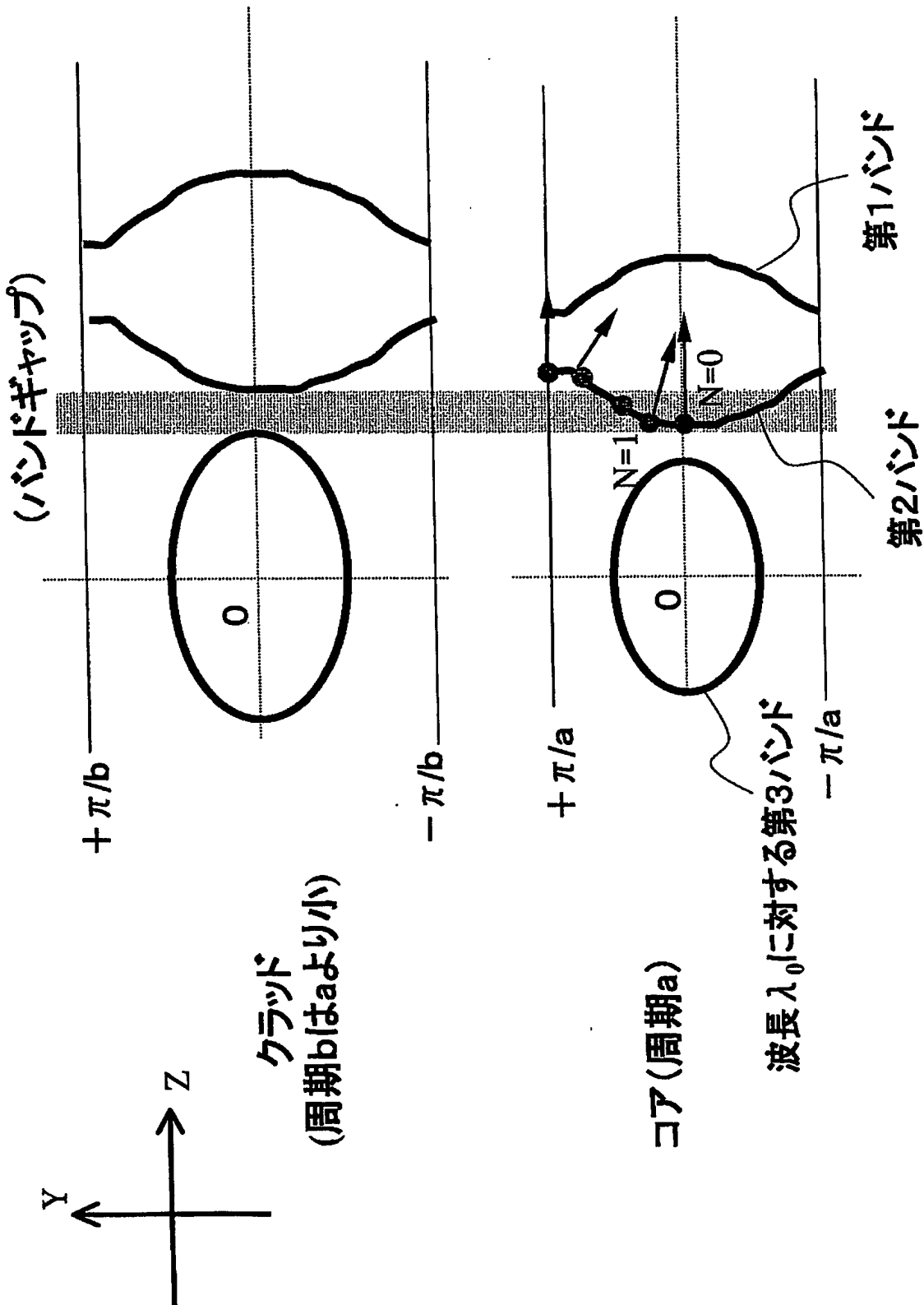
【図 3 4】



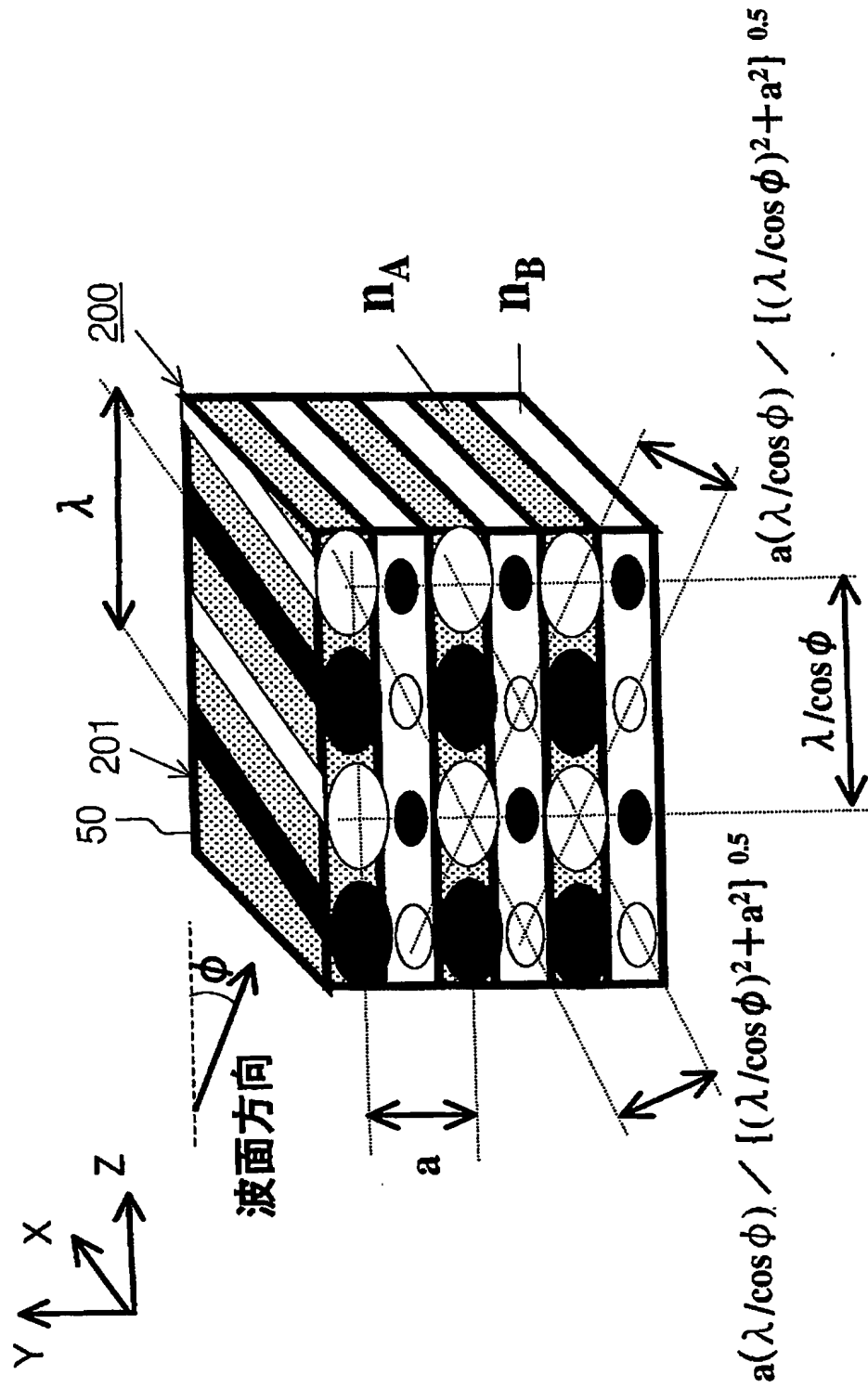
【図 35】



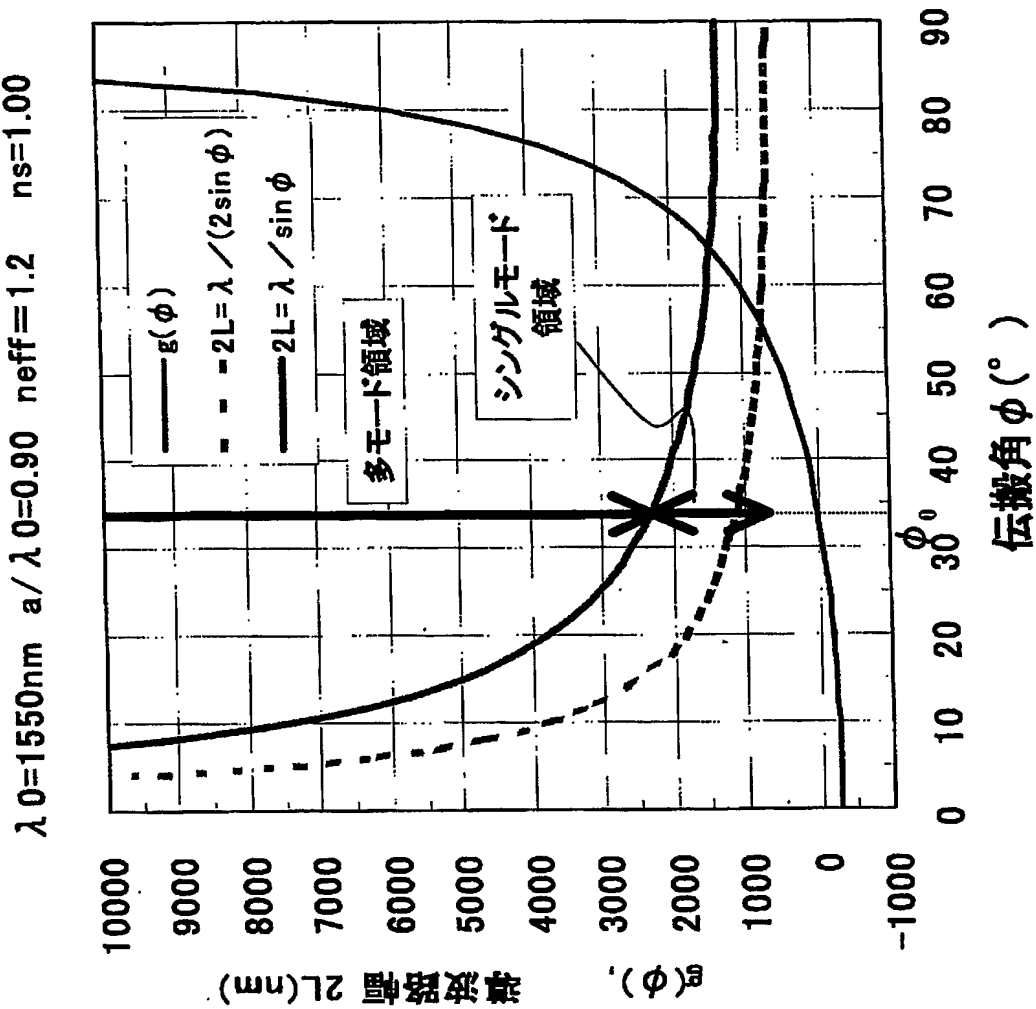
【図36】



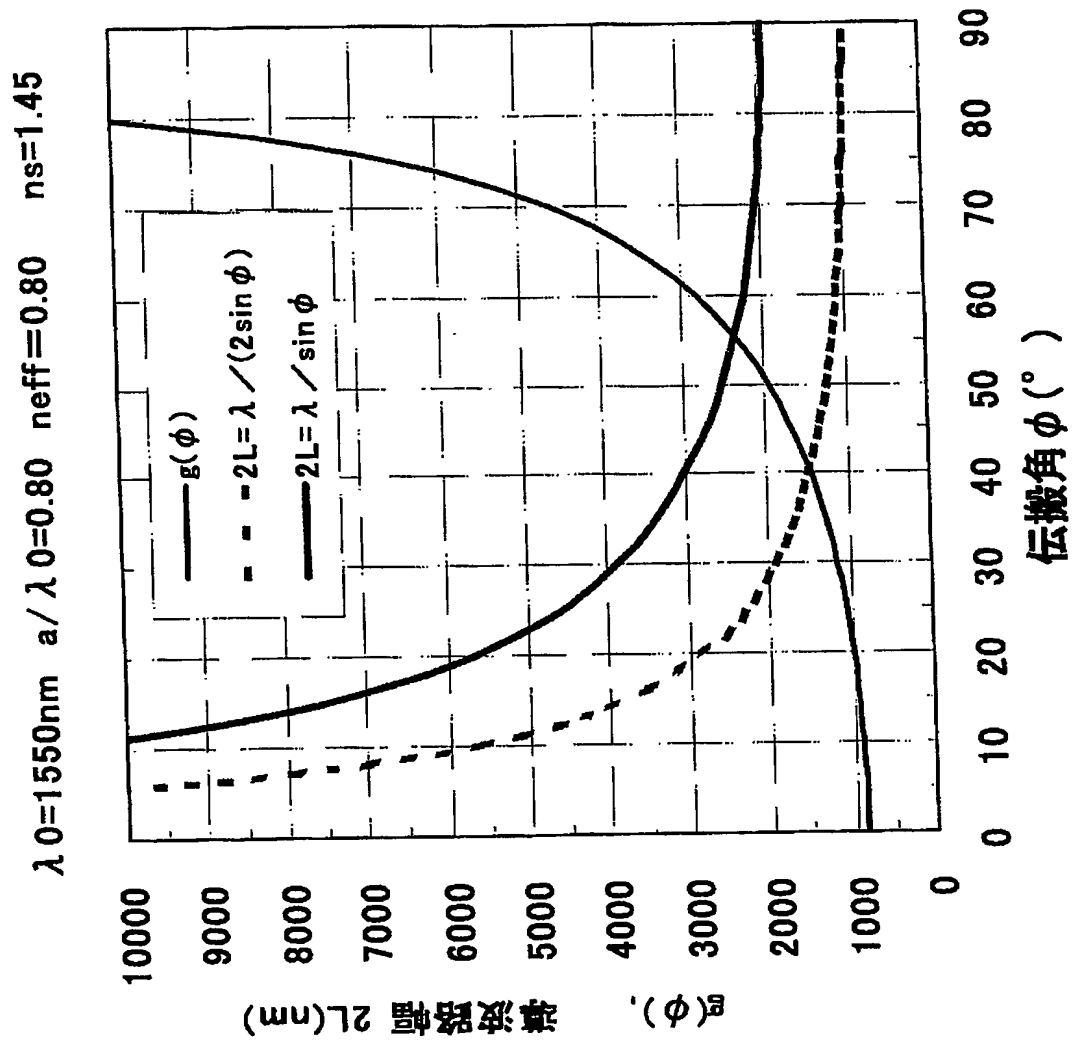
【図 37】



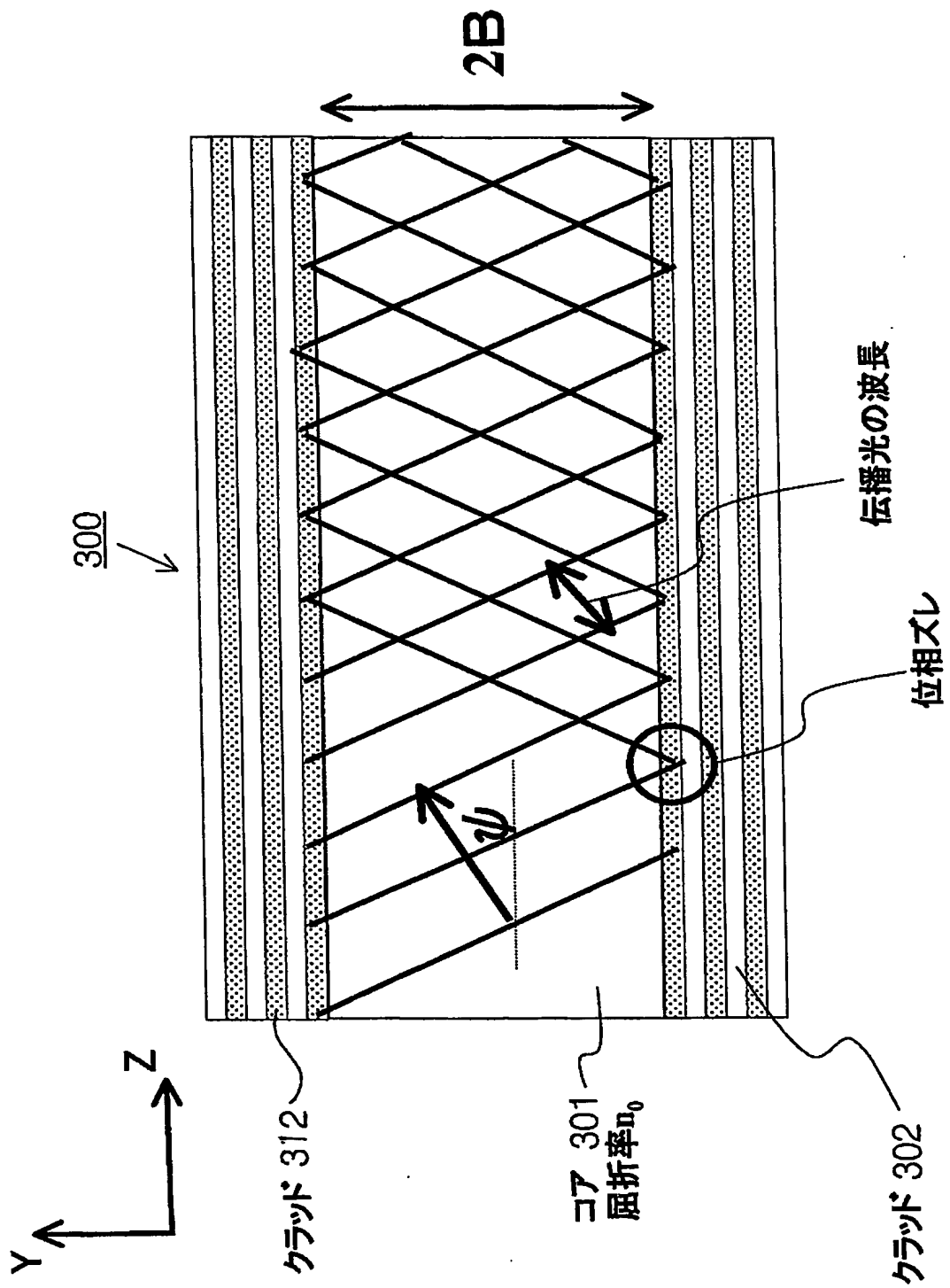
【図38】



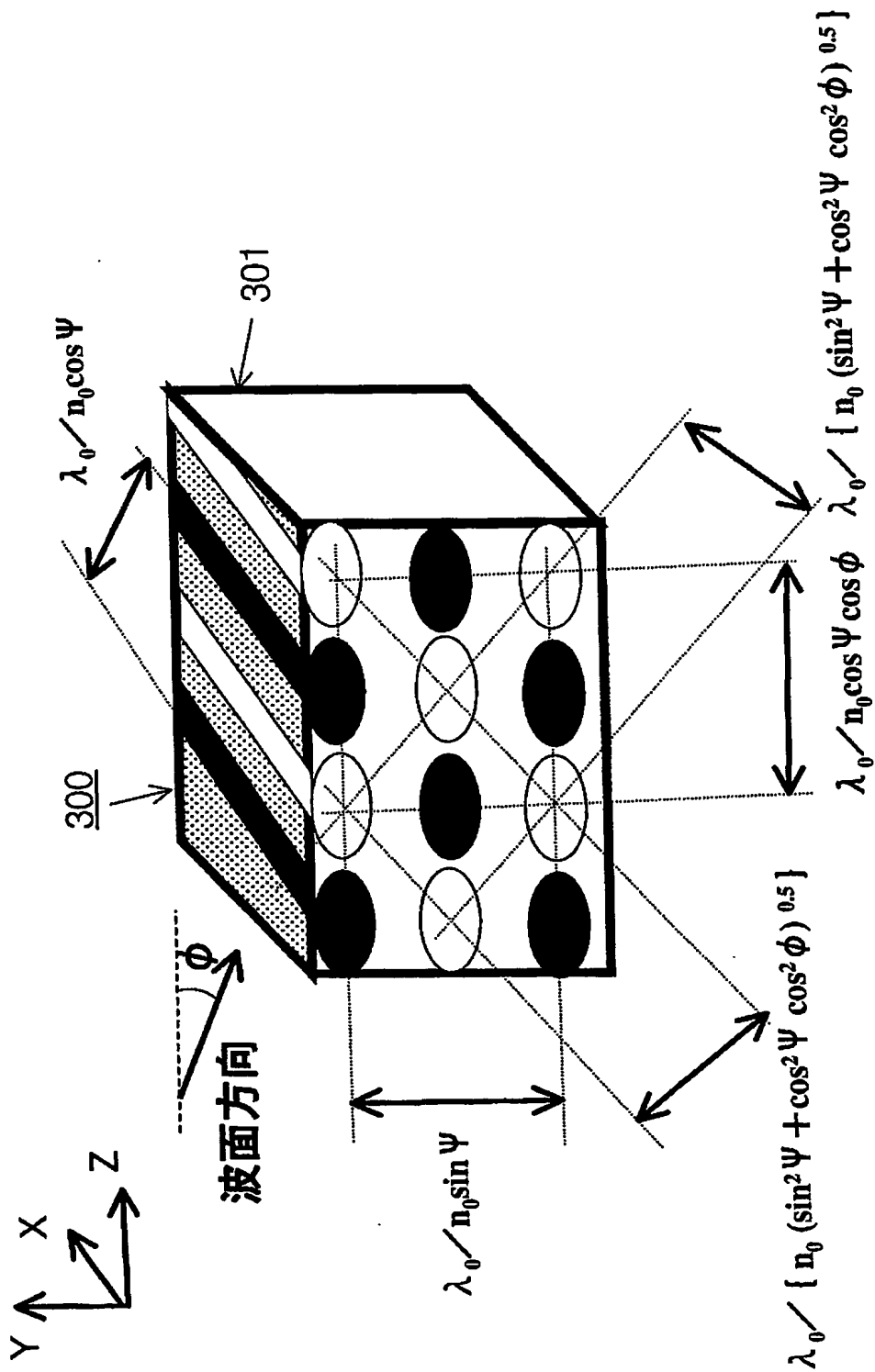
【図 39】



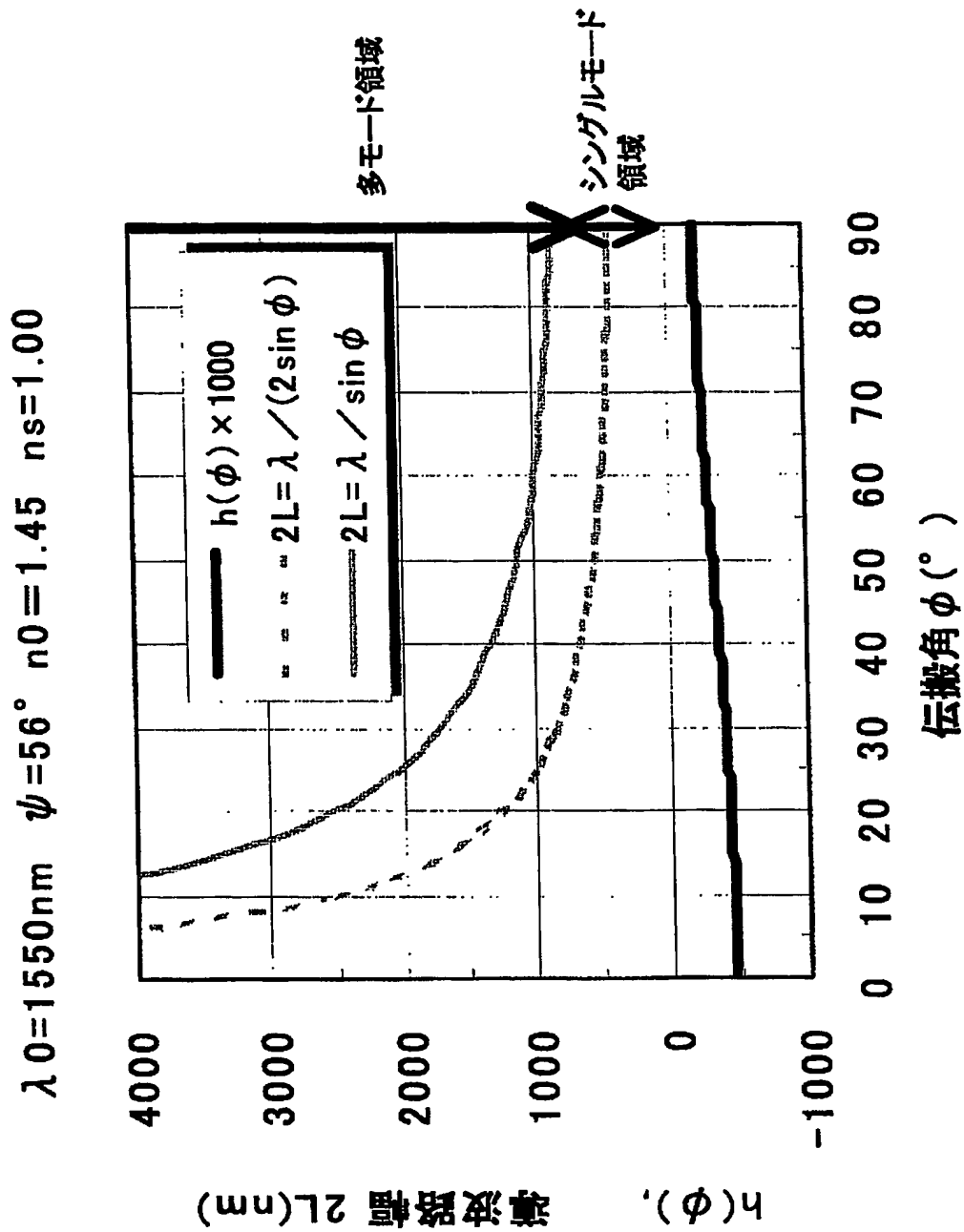
【図 40】



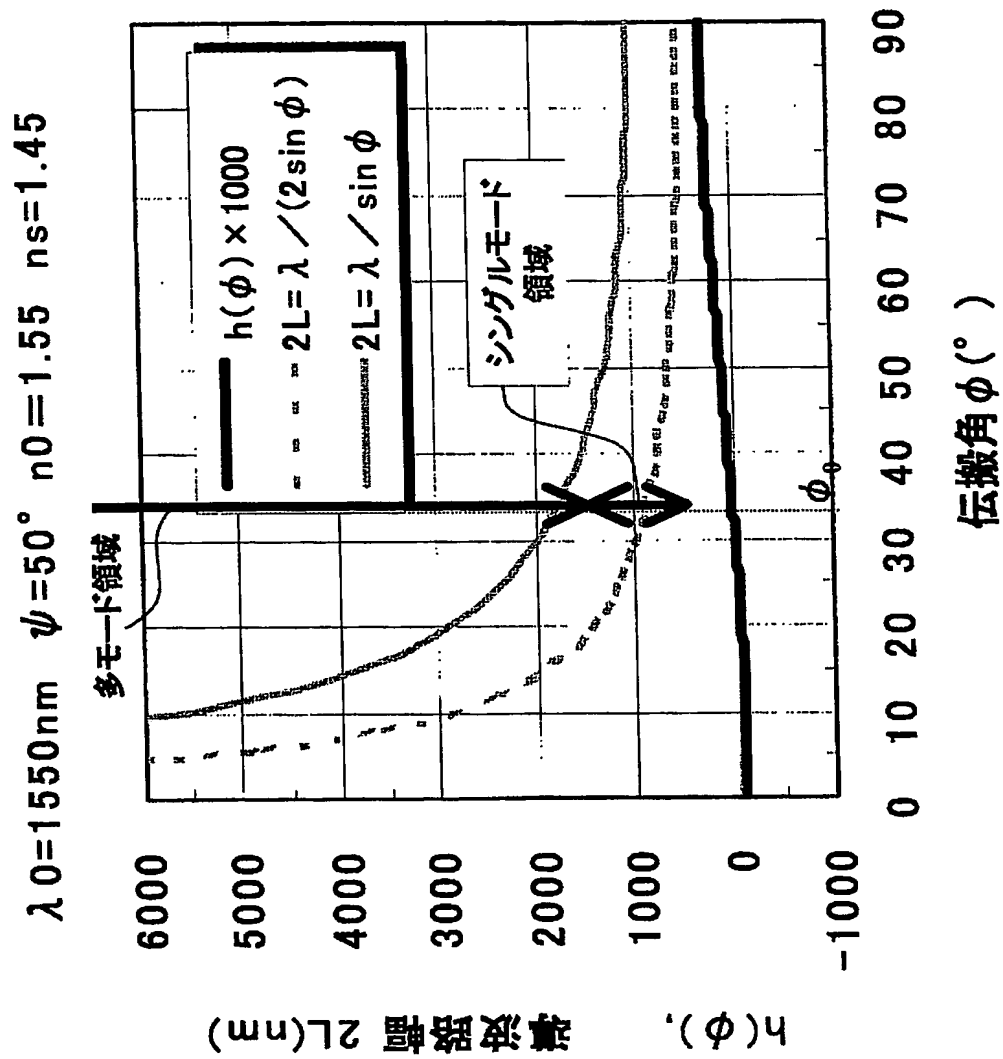
【図 4 2】



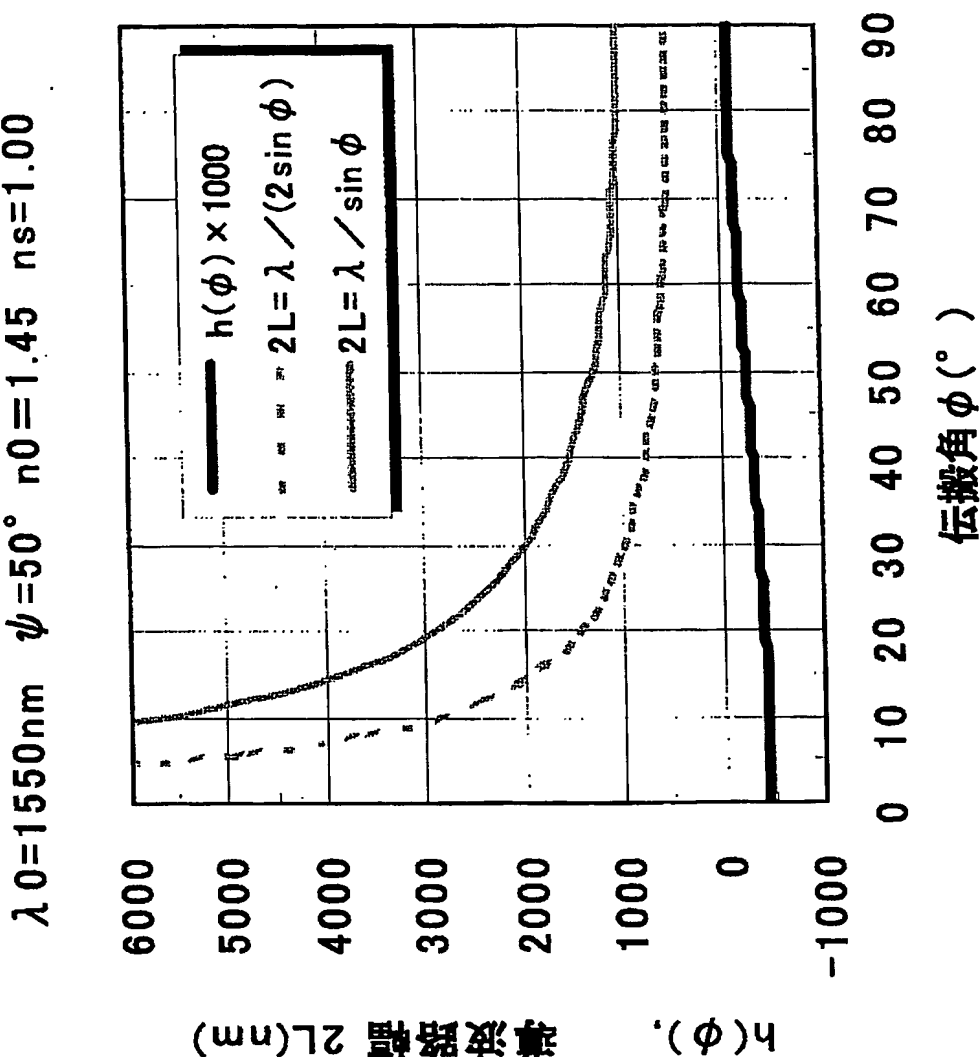
【図 4 3】



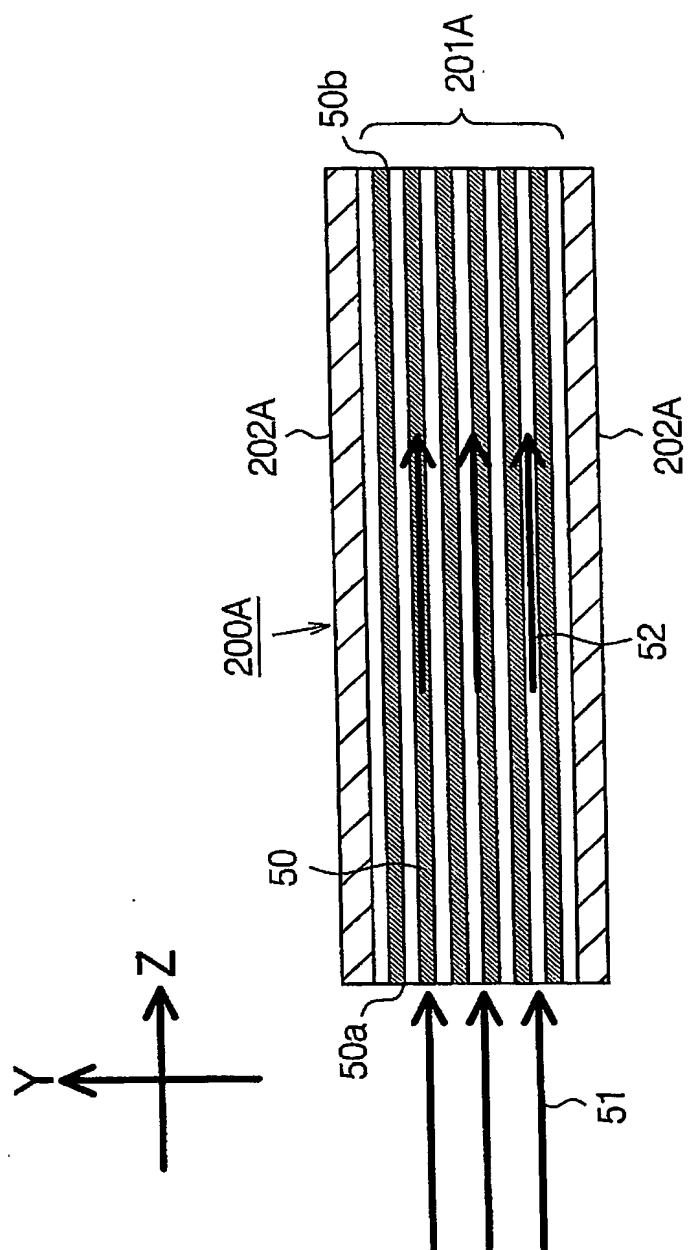
【図 44】



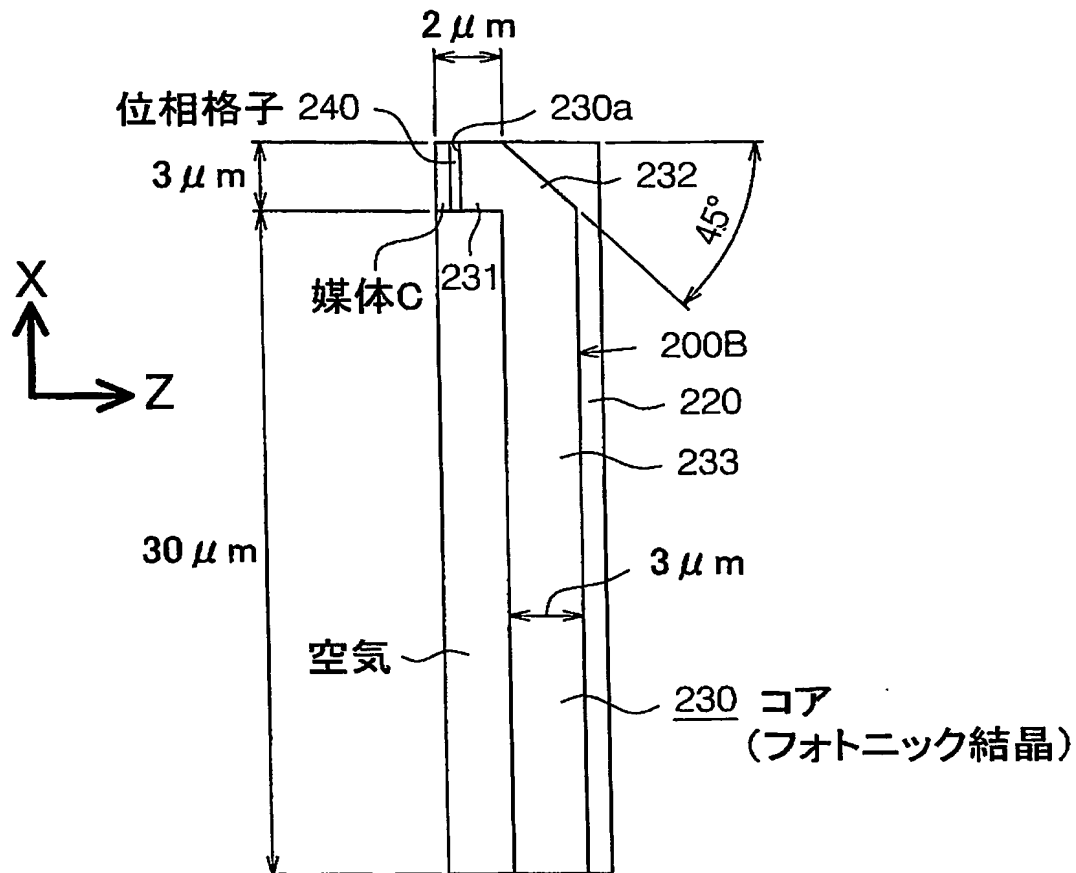
【図45】



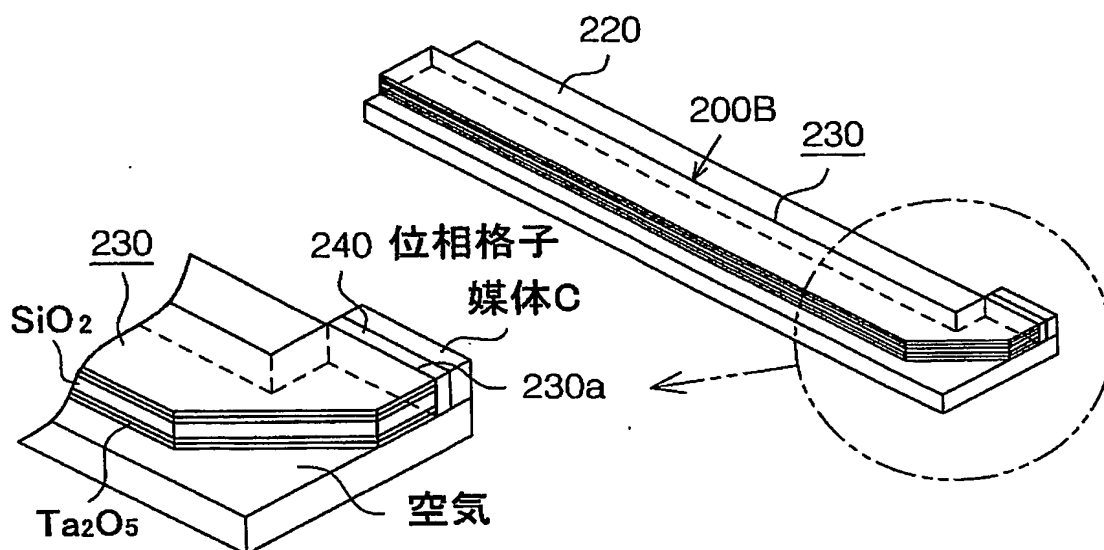
【図 46】



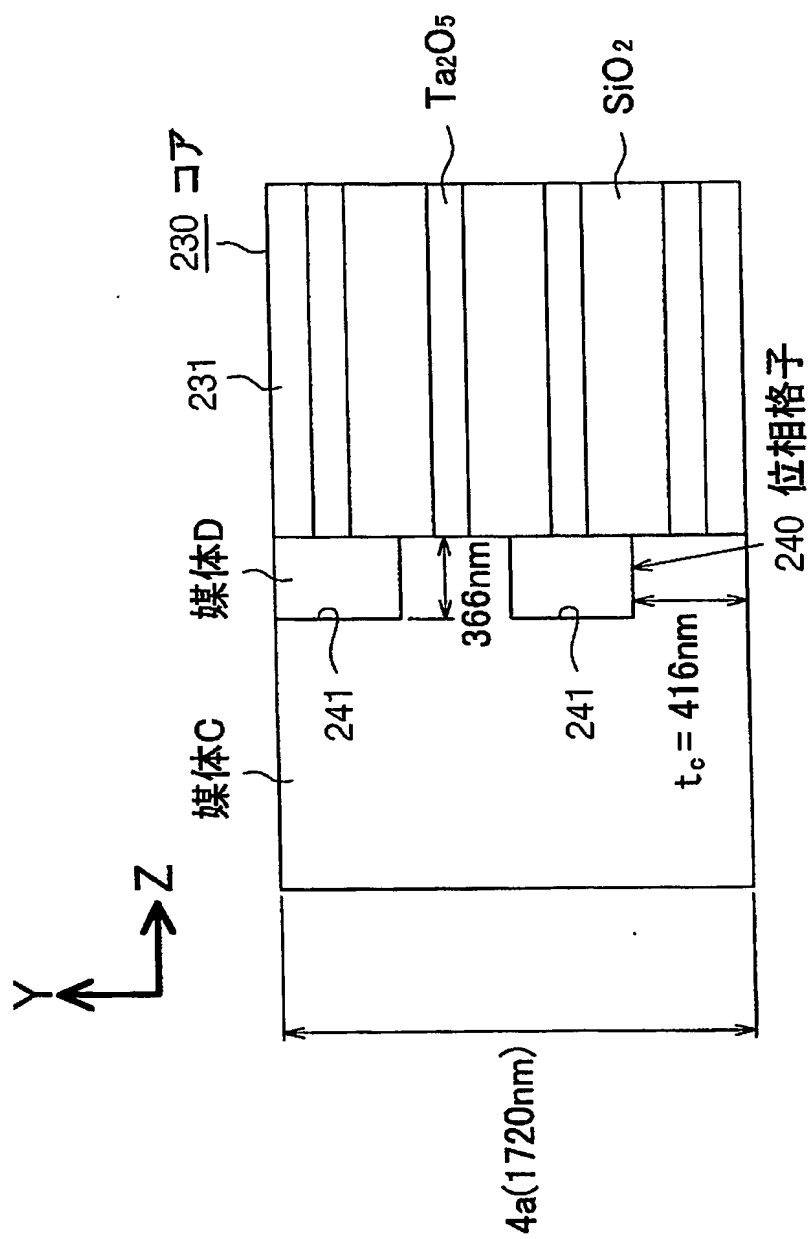
【図 4 7】



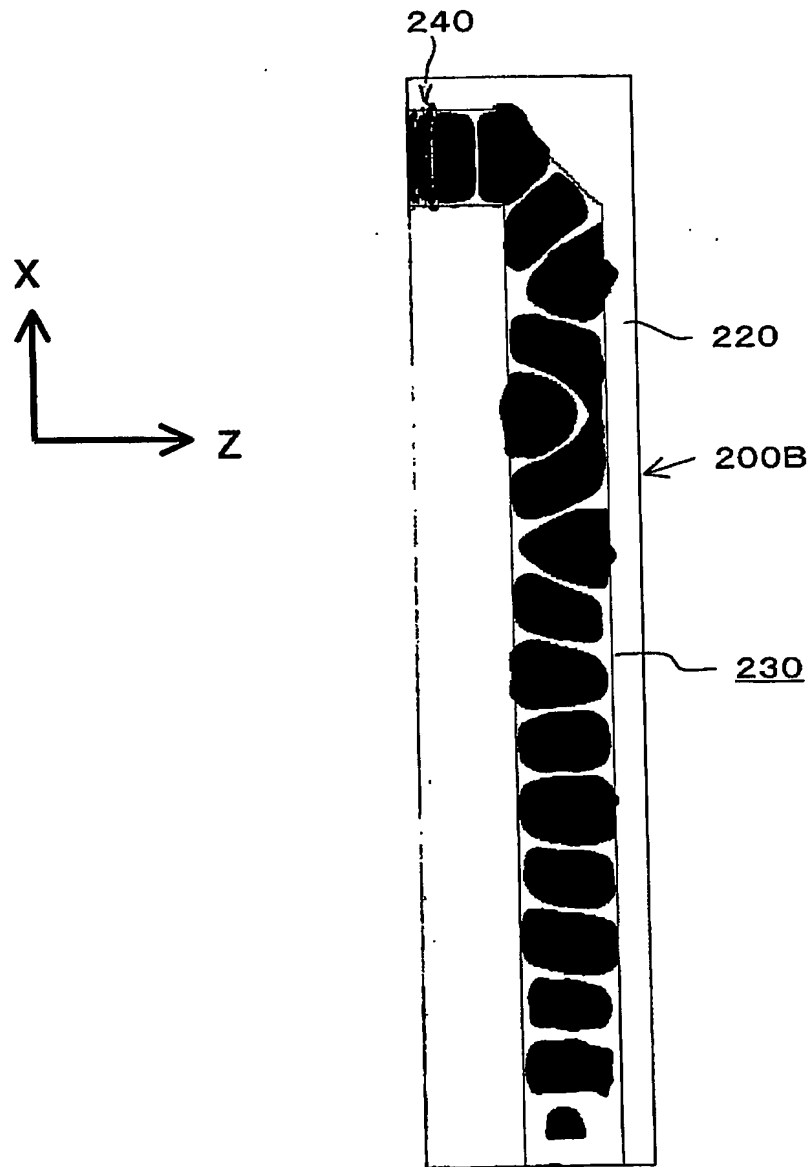
【図 4 8】



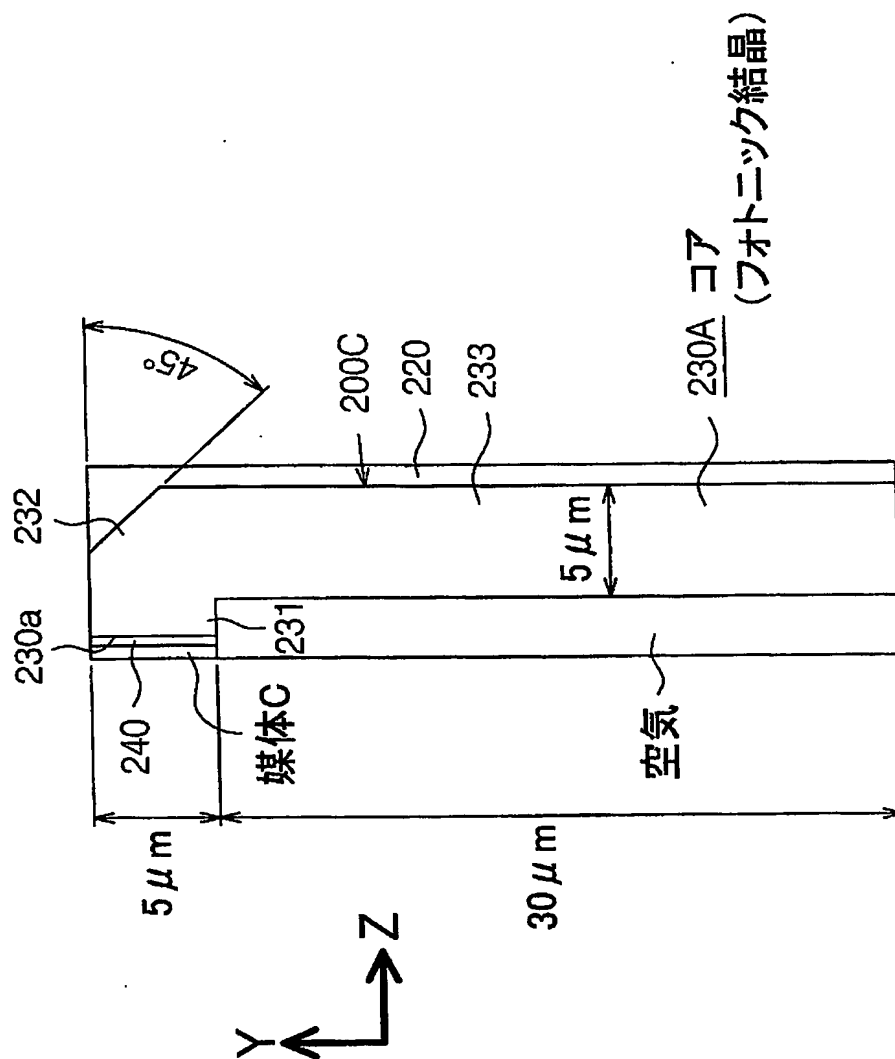
【図 49】



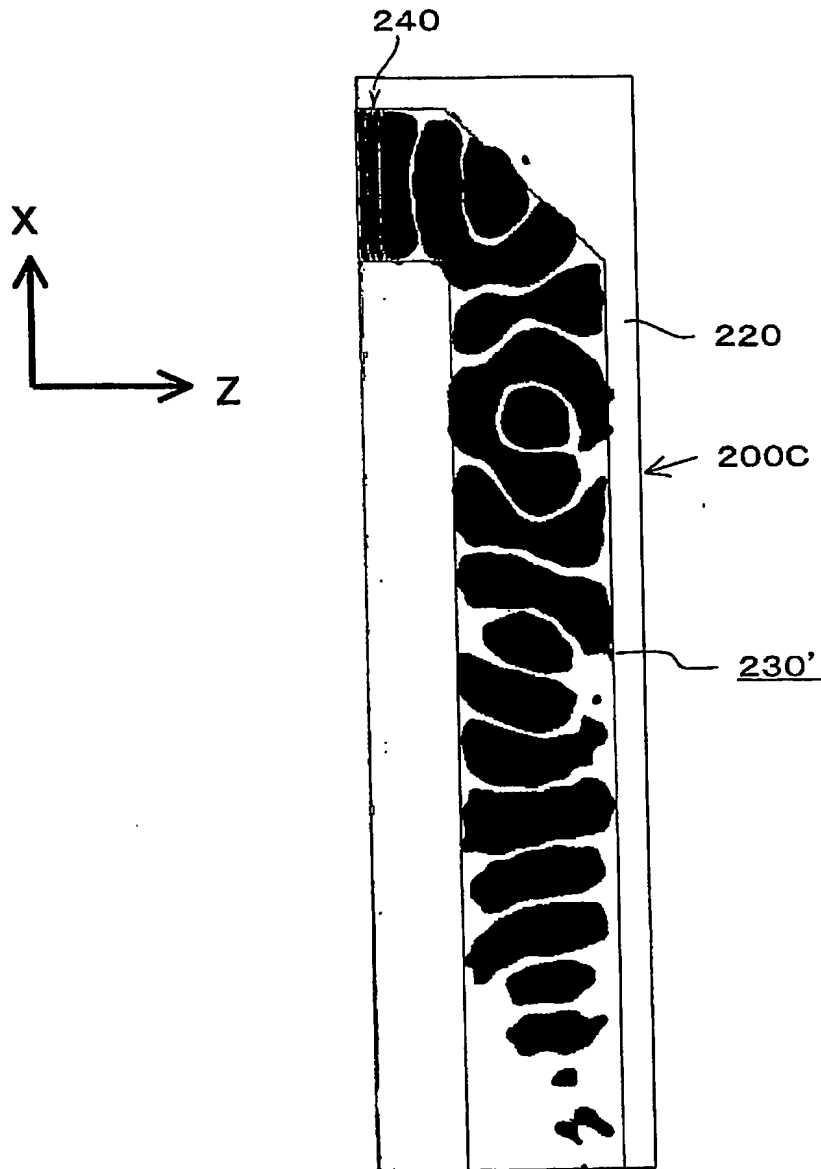
【図 50】



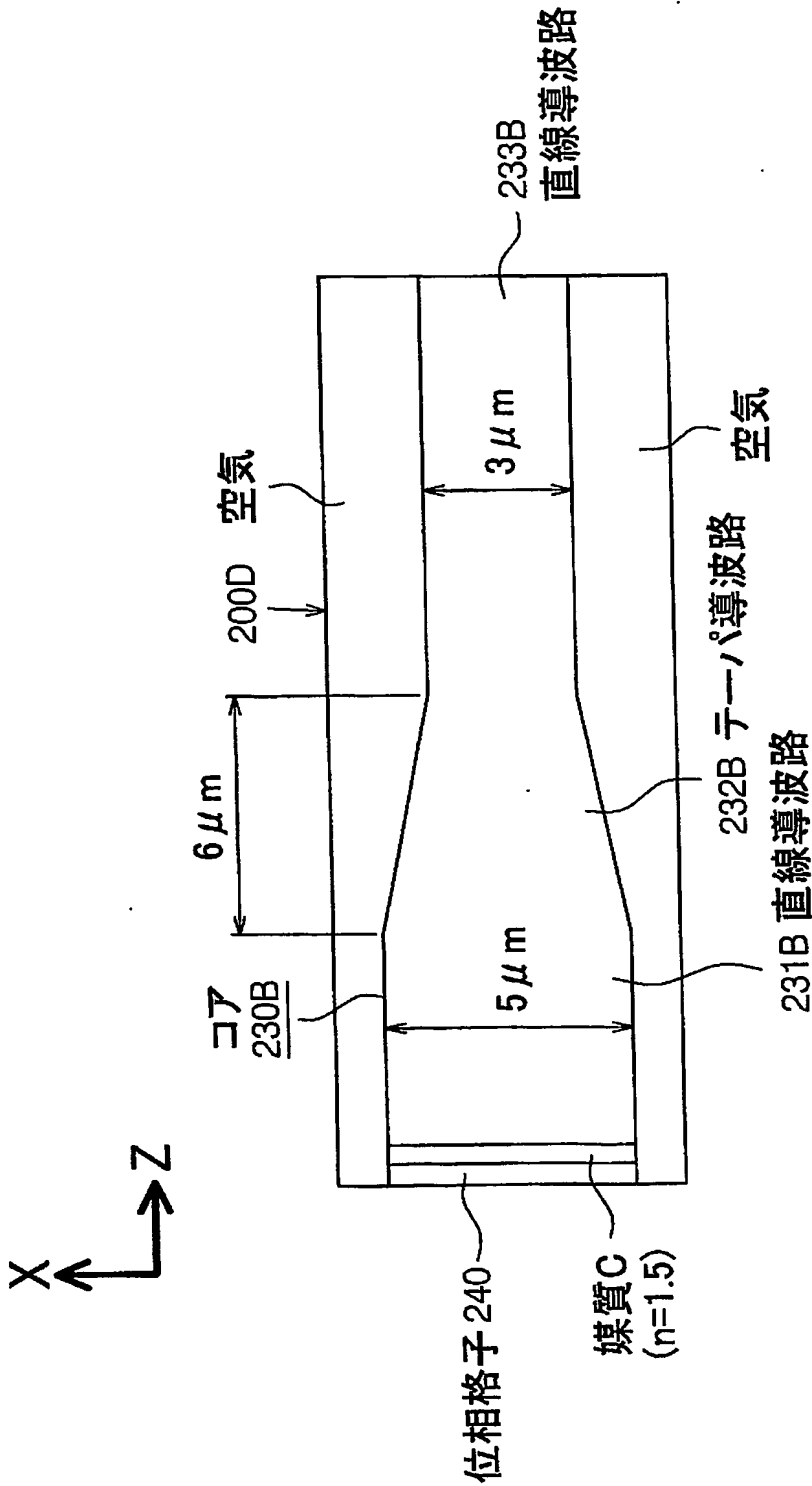
【図 51】



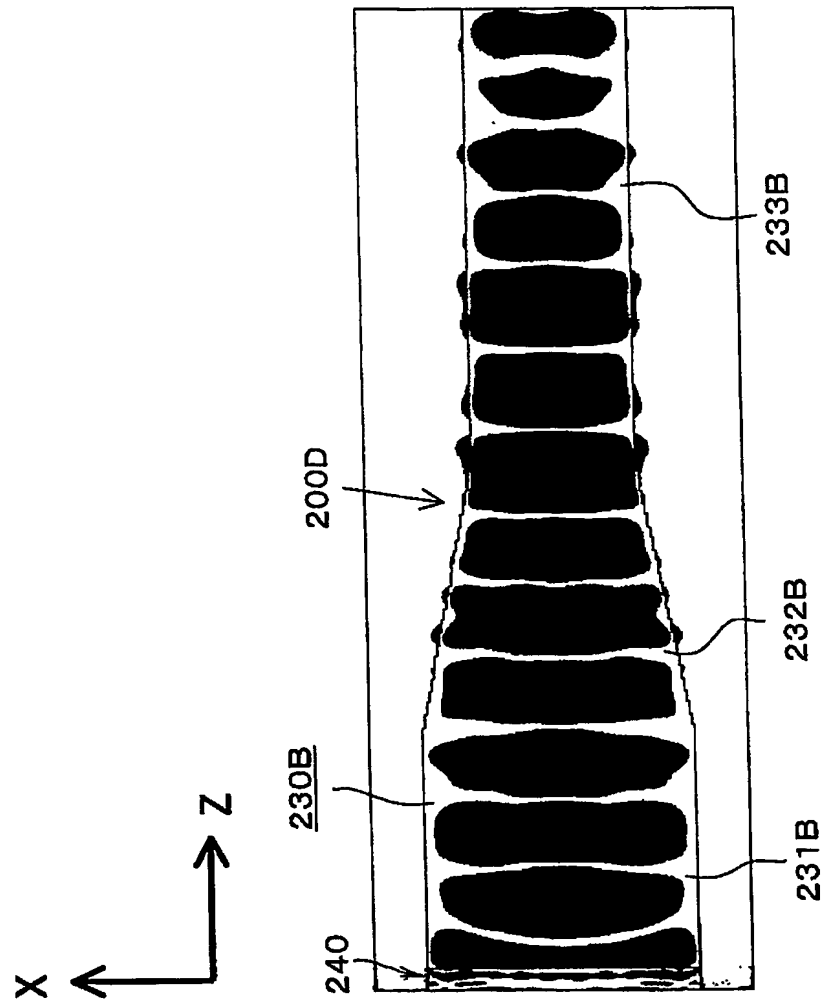
【図 5 2】



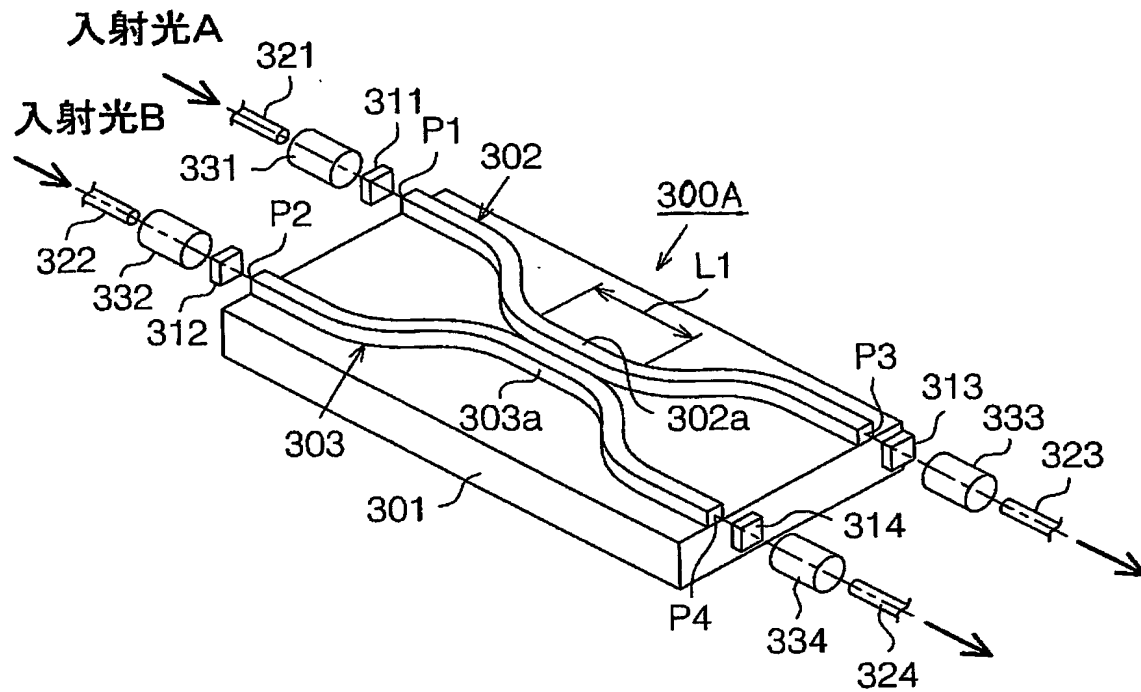
【図 53】



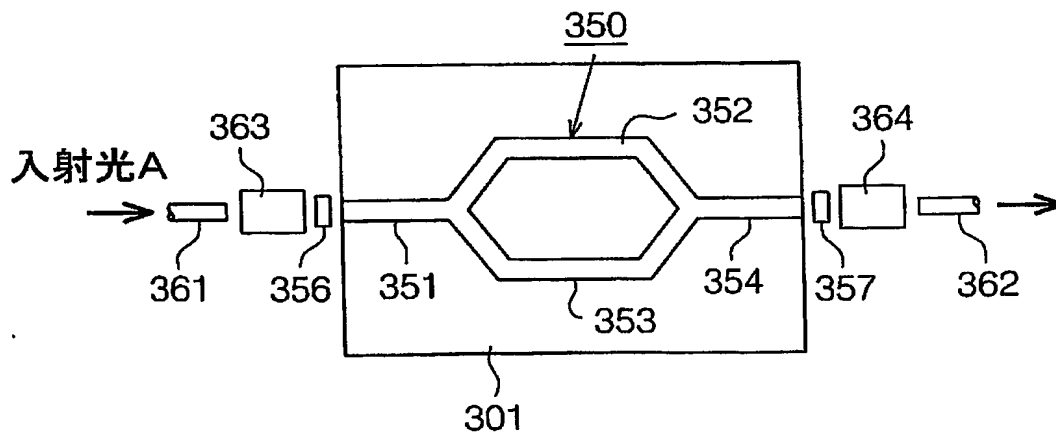
【図 54】



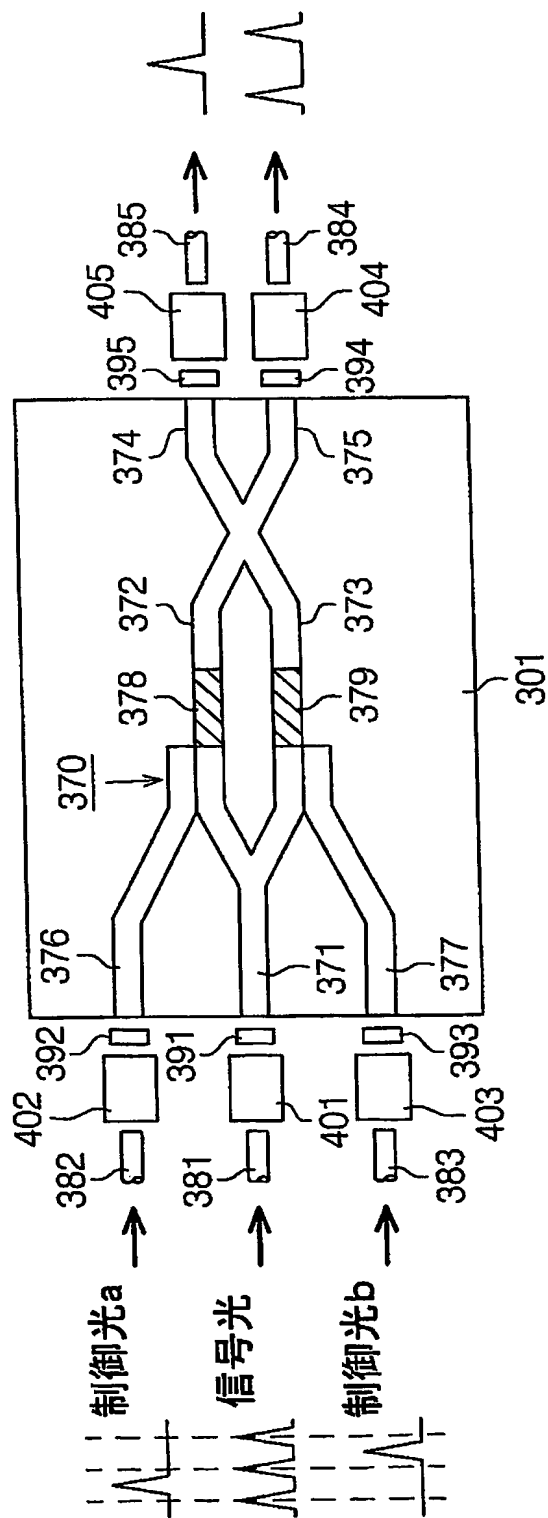
【図 5 5】



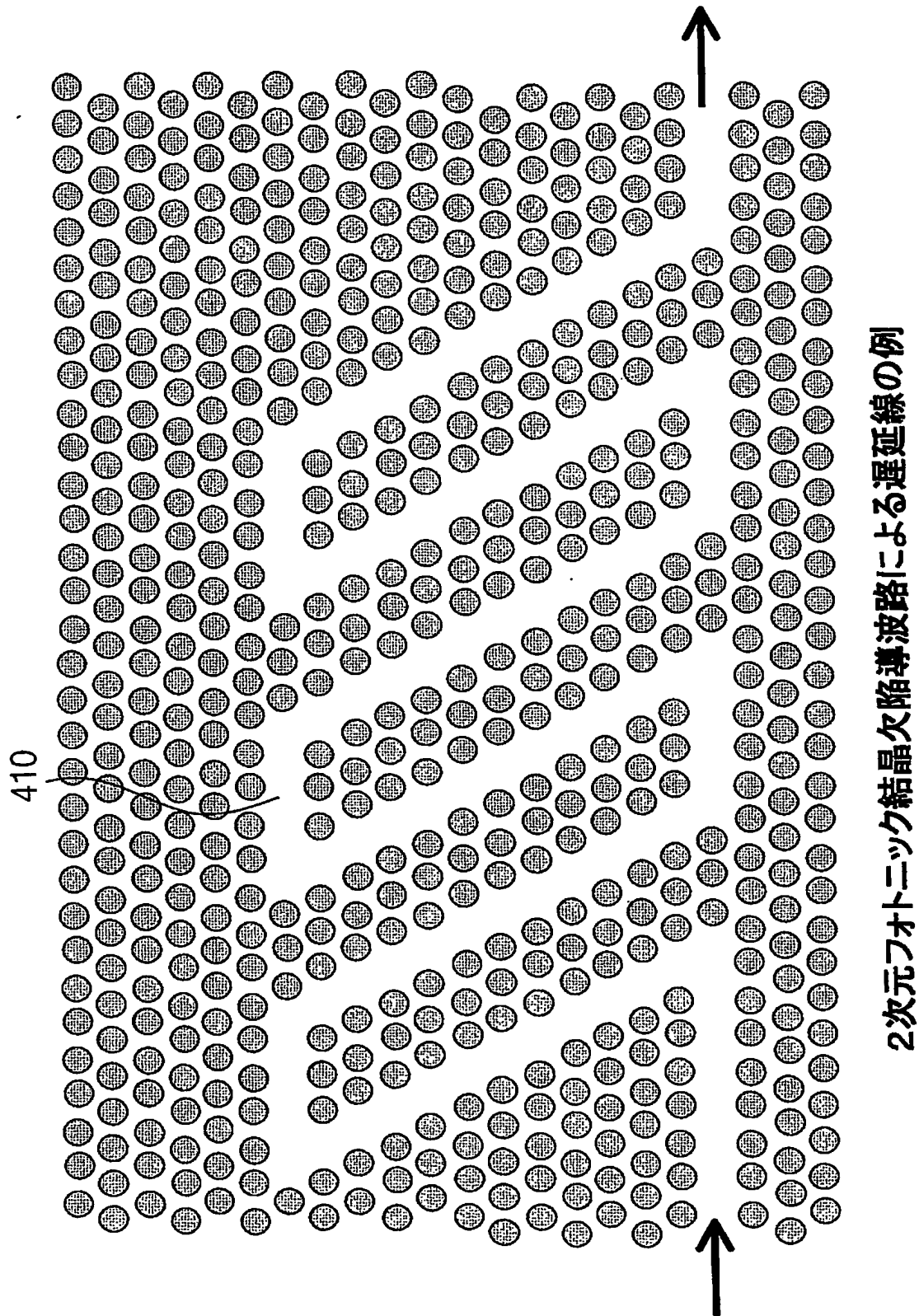
【図 5 6】



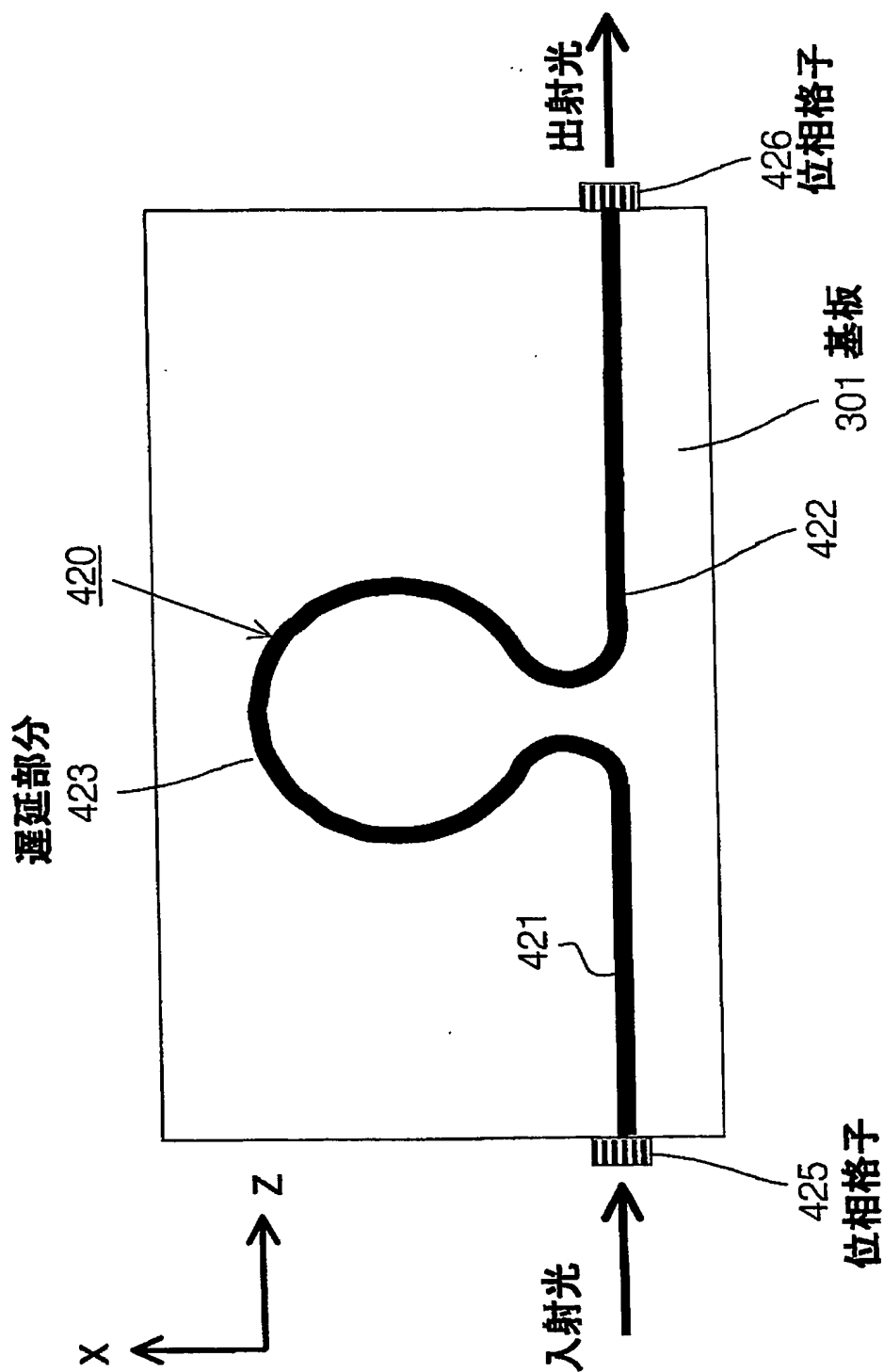
【図 57】



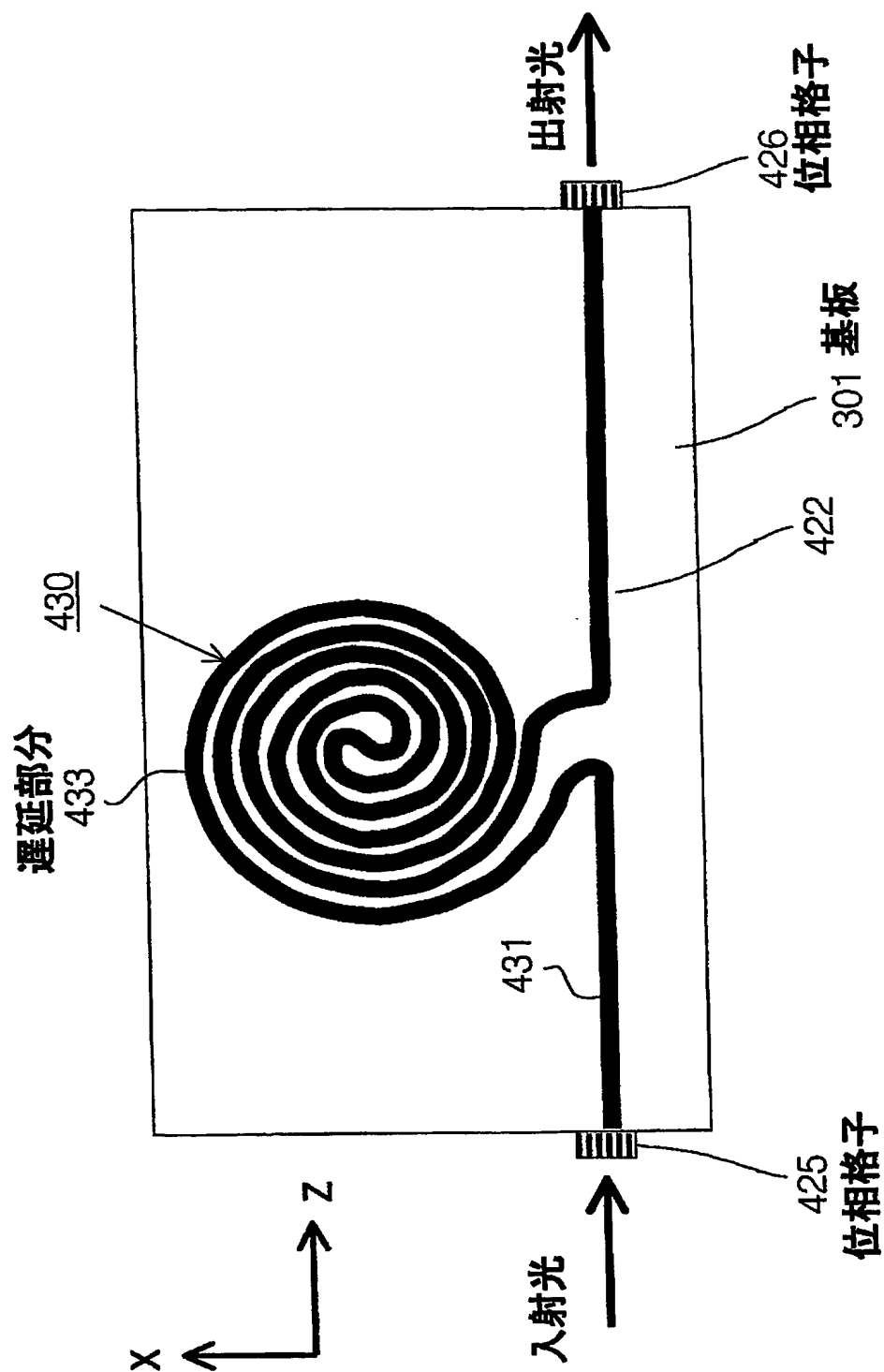
【図 58】



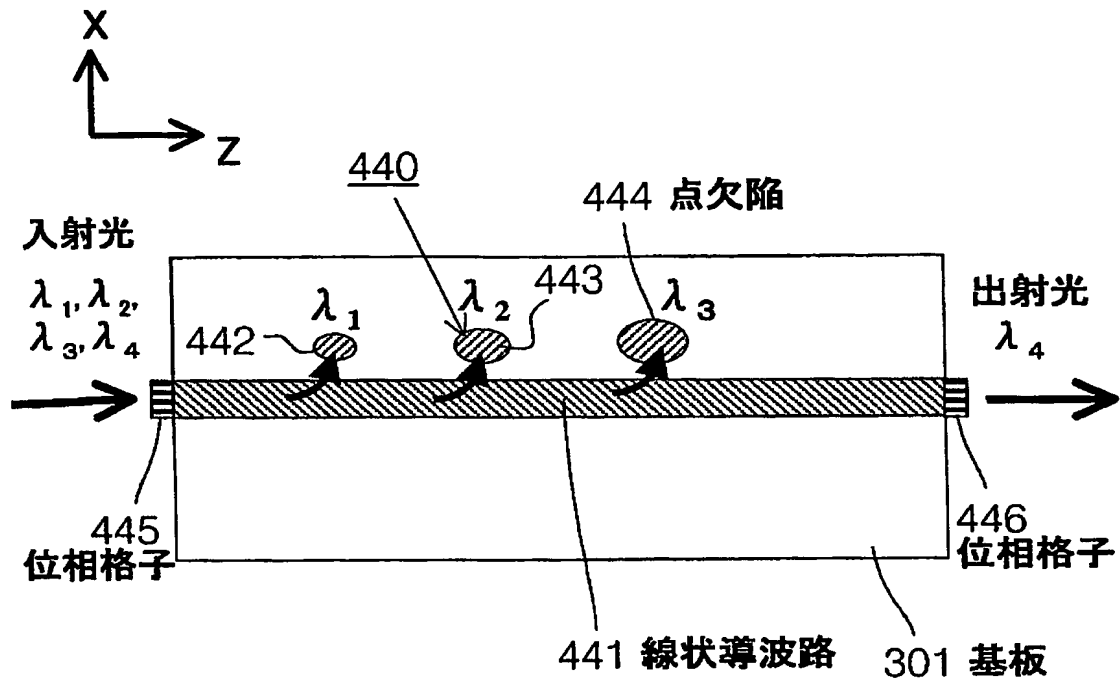
【図 59】



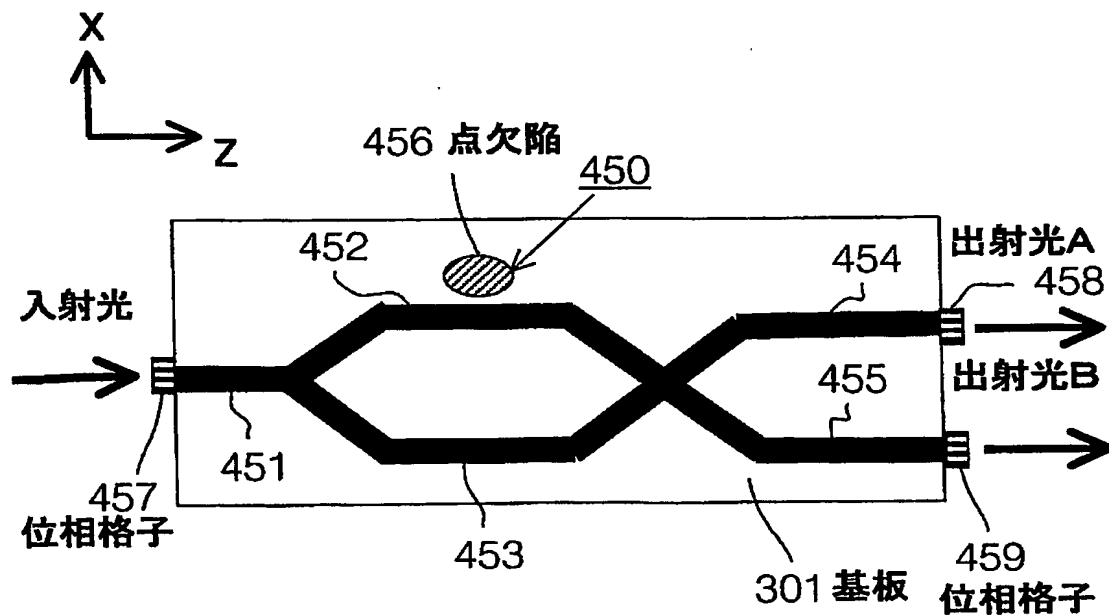
【図 60】



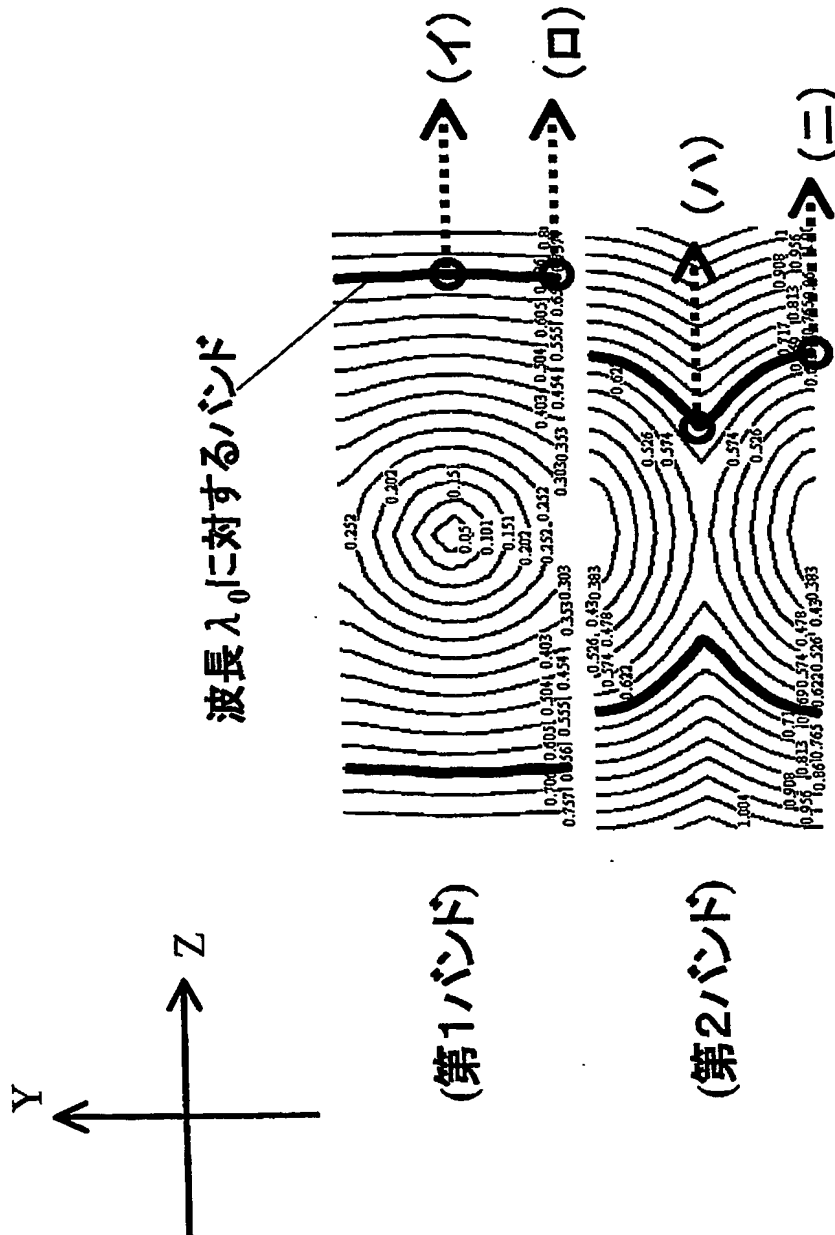
【図 6 1】



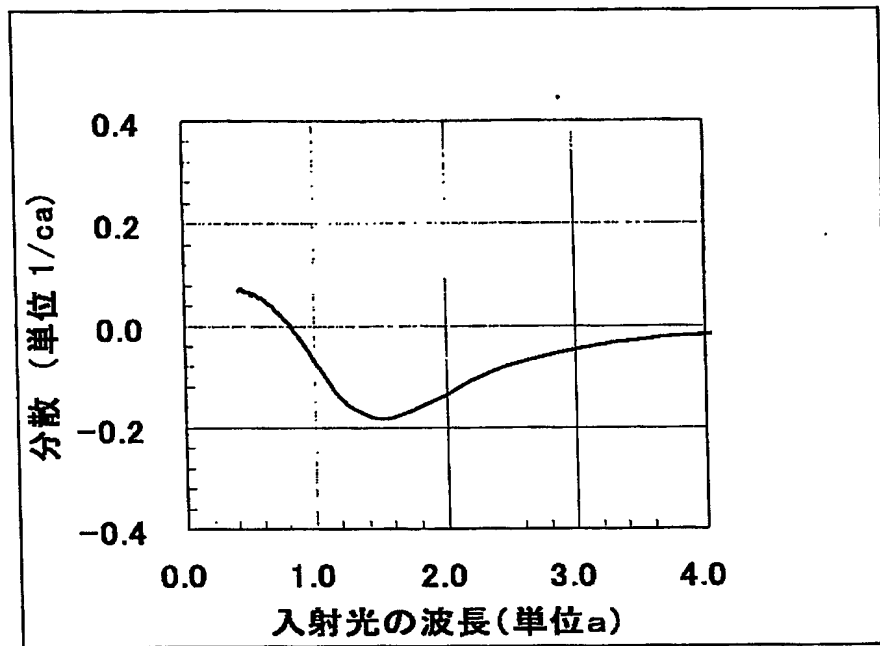
【図 6 2】



【図63】

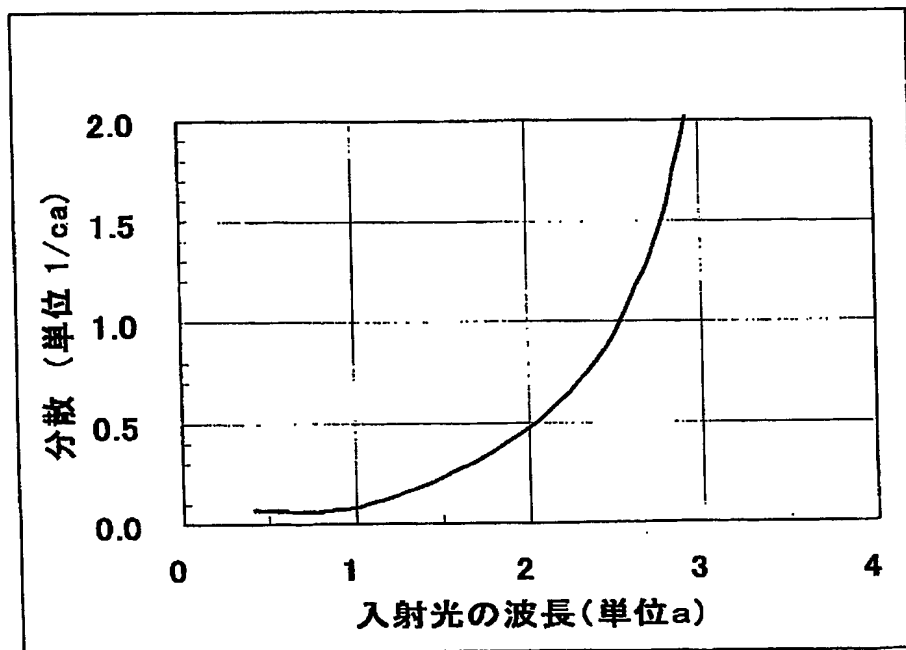


【図 6 4】



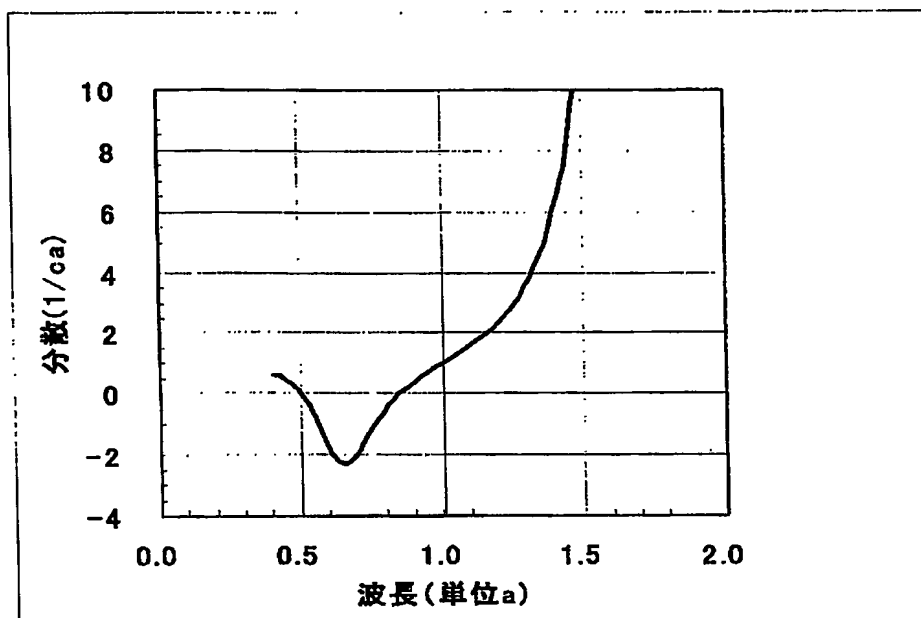
(イ)

【図 6 5】



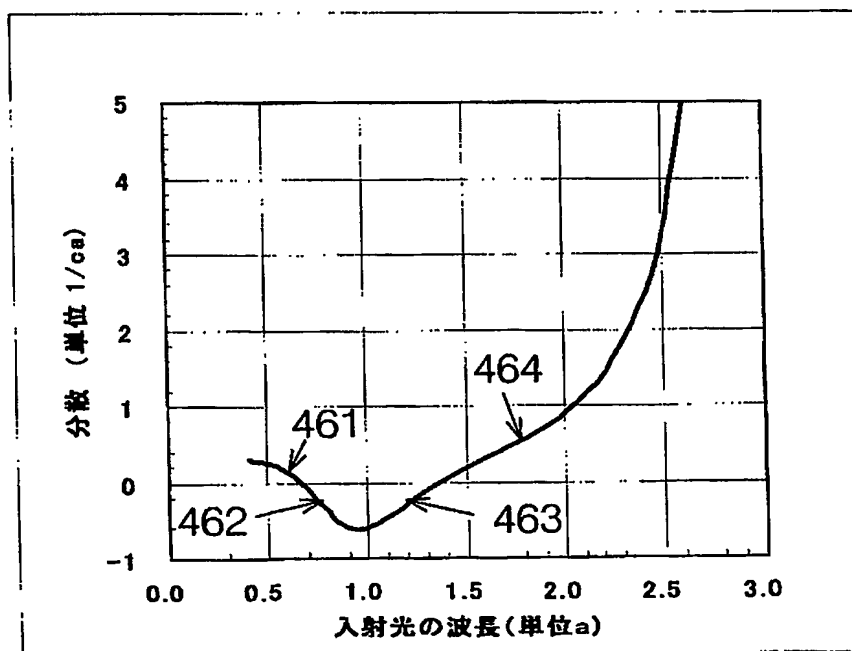
(ロ)

【図 66】



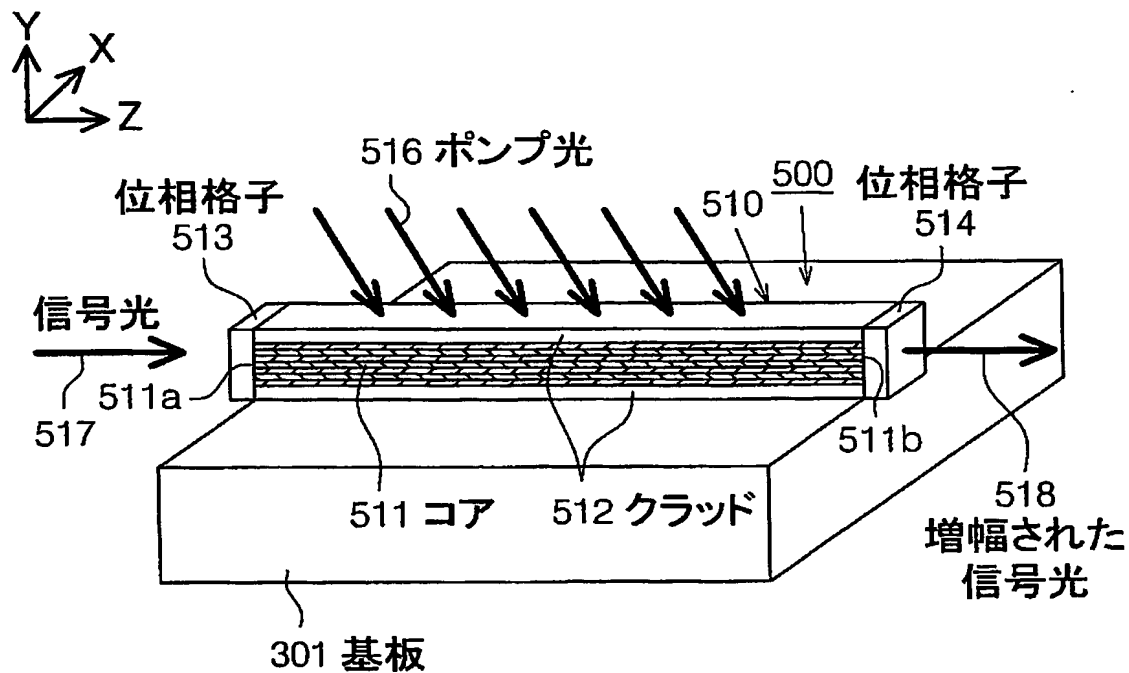
(ハ)

【図 67】

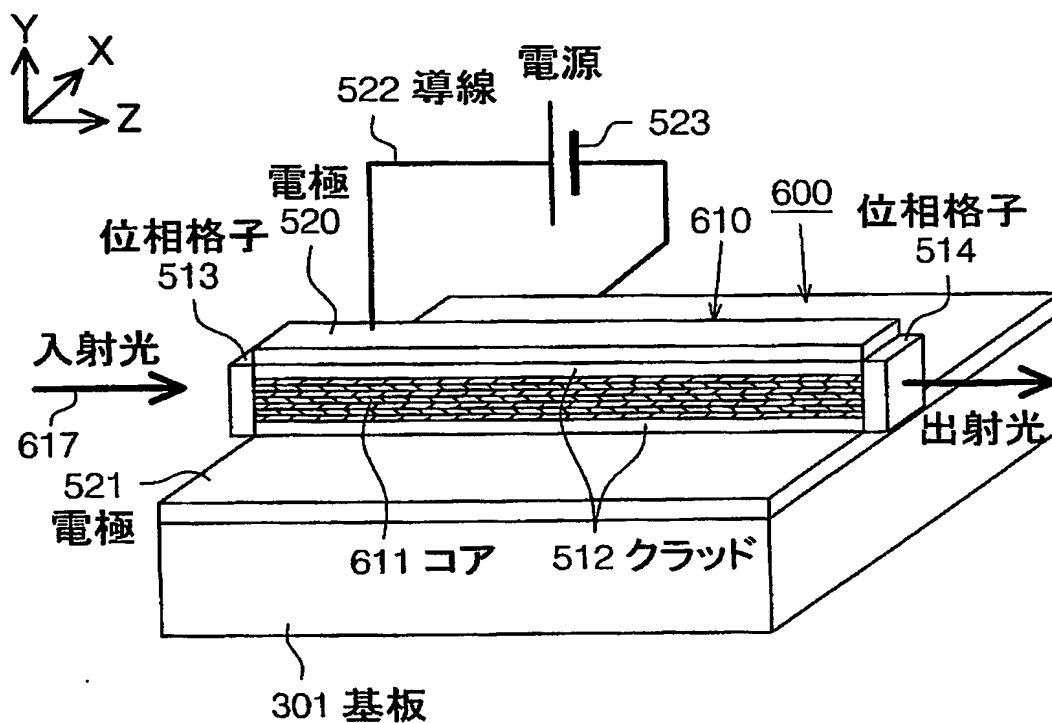


(二)

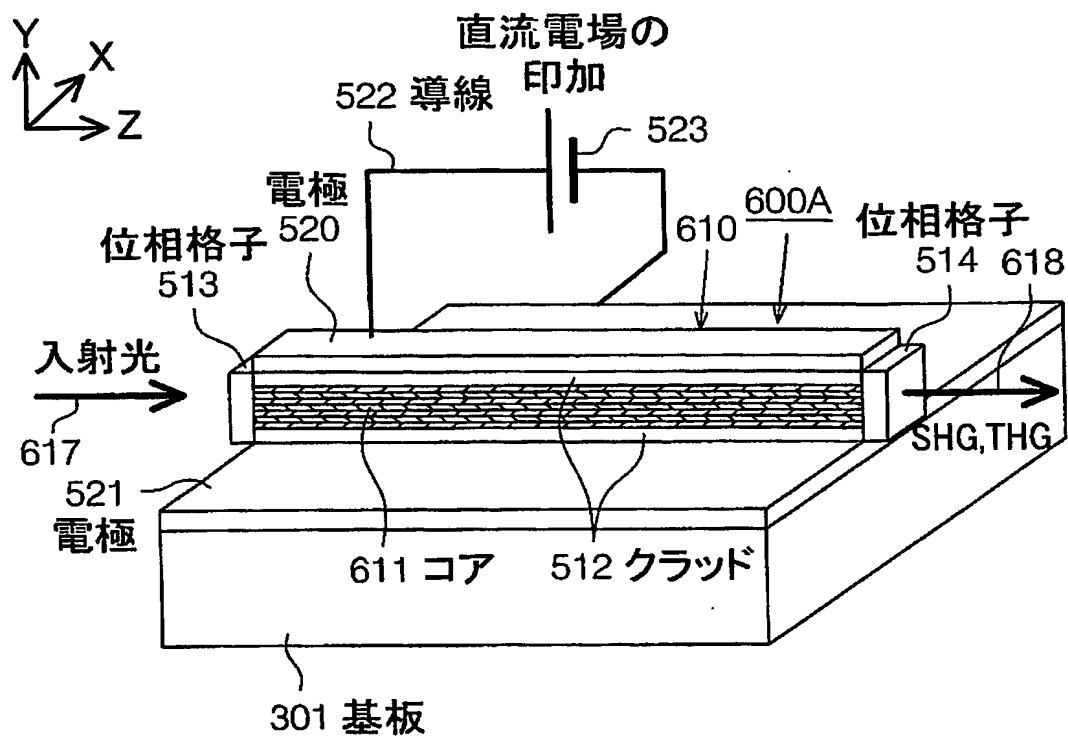
【図 68】



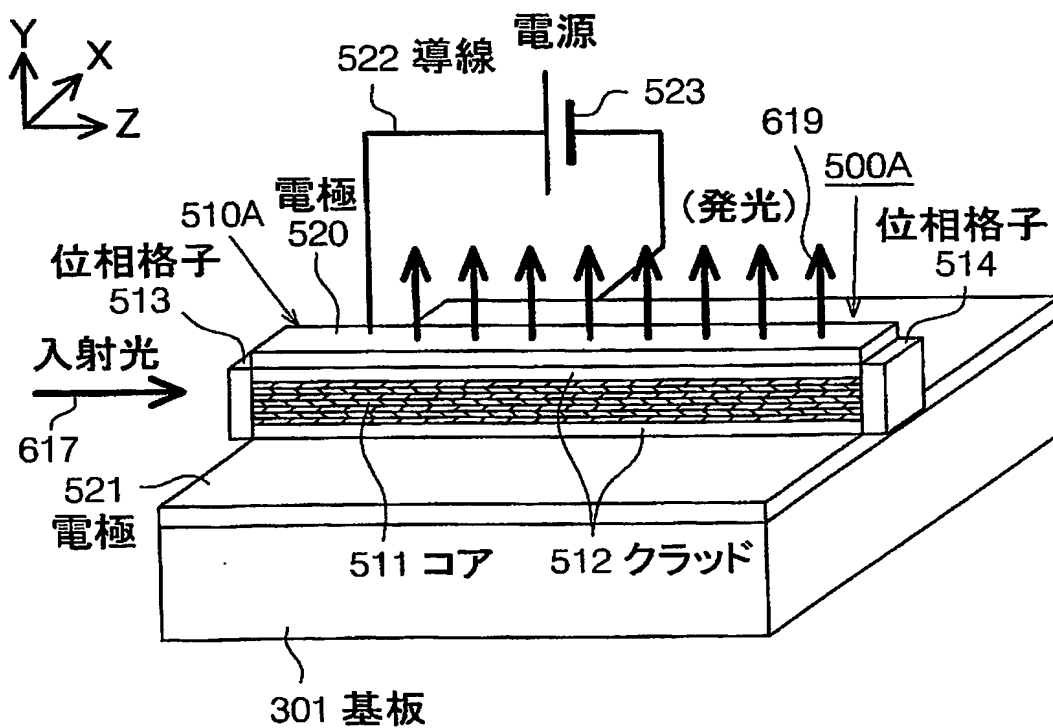
【図 69】



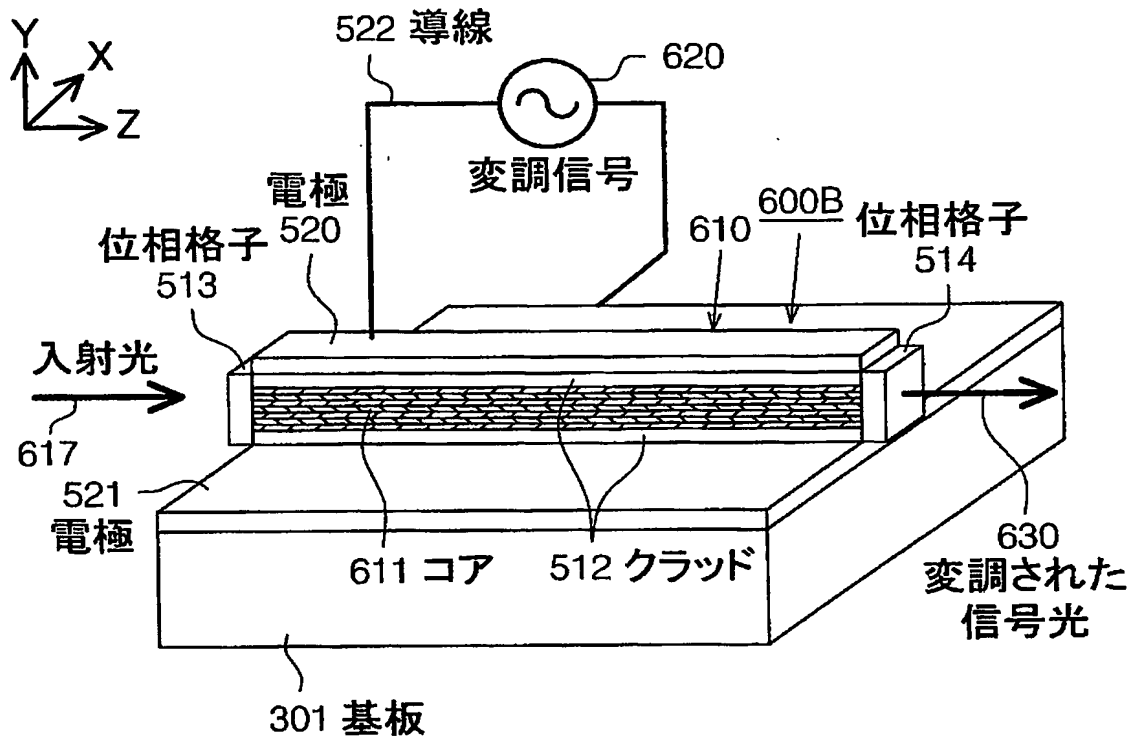
【図 70】



【図 71】



【図 7 2】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 急激曲げや自由な角度での配置が可能で、かつ低伝搬損失のフォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、およびこれらを用いた光学素子を提供すること。

【解決手段】 Y方向に周期性のあるフォトニック結晶50で構成されたコア201を有するフォトニック結晶導波路200である。電磁波はコアのフォトニックバンド構造におけるブリルアンゾーン境界線上のバンドによって伝播し、コアのY方向と平行な側面は屈折率 n_s の均質媒体と接し、電磁波の真空中での波長を λ_0 、フォトニック結晶の周期を a 、コア内を伝播する波動のXZ平面方向の周期を λ とし、 $\lambda_0/n_s > a\lambda/(\lambda^2/4 + a^2)^{0.5}$ の条件を満たす。この条件は、導波路200の側面から漏れ光が生じないようにする最低限必要な条件で、これを満たすことでコア内を伝播する波動を伝搬角 $\phi = 0^\circ$ の場合に側面で閉じ込めることができる。

【選択図】 図29

特願 2003-199538

出願人履歴情報

識別番号 [000004008]

1. 変更年月日 2000年12月14日
[変更理由] 住所変更
住 所 大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号
氏 名 日本板硝子株式会社
2. 変更年月日 2004年 7月 1日
[変更理由] 住所変更
住 所 東京都港区海岸二丁目1番7号
氏 名 日本板硝子株式会社

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.